

Faserverbundkunststoffe mit gitterartigen Textilien für den Leichtbau in der Automobilindustrie

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Sonja Krömer
aus Langenhagen

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
10.12.2019

Dekan

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Spitzer

Vorsitzende der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen. Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

-

Publications about the content of this work require the written consent of Volkswagen Aktiengesellschaft. The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin in der Verfahrensentwicklung des Geschäftsfelds Kunststoff der Komponente der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann gilt mein besonderer und vollumfänglicher Dank für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie für die wertvollen Anregungen in zahlreichen Gesprächen und Diskussionen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel für die Übernahme des Zweitgutachters und die damit verbundenen hilfreichen Diskussionen. Ein weiterer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bei diesem Promotionsverfahren.

Mein großer Dank gilt dem VW-Konzern sowie meiner fachlichen Betreuerin innerhalb des Konzerns für die Bereitstellung des Themas, die exzellenten Rahmenbedingungen zur Anfertigung dieser Arbeit und das Vertrauen in meiner Person. Ebenfalls möchte ich den Kollegen aus der Frontendentwicklung meinen Dank aussprechen, die mir einen interessanten Einblick in die Entwicklung und Freiprüfung der Bauteile gegeben haben.

Ein herzliches Dankeschön geht an alle Kollegen meiner ehemaligen Abteilung für den intensiven Austausch, die tatkräftige Unterstützung und Hilfsbereitschaft sowie für das großartige Arbeitsklima und die kurzweiligen fachlichen Diskussionen. Ein ganz besonderer Dank gilt hierbei einer besonderen und guten Freundin, die mich durch Höhen und Tiefen der Arbeit begleitet und mich stets aufgemuntert und angespornt hat. Ein weiterer Dank gilt den Studenten, die das Promotionsthema im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten mit Eifer und Ehrgeiz vorangetrieben haben. Ebenfalls möchte ich mich bei dem Materiallieferanten Delcotex und bei dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden für die gemeinsame Weiterentwicklung des Materials und die großzügige Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die bedingungslose Unterstützung und Förderung während meines gesamten Studiums. Ebenfalls bedanke ich mich bei meinen Omas sowie meinem Bruder und der übrigen Familie, die immer an mich geglaubt und mich nach besten Möglichkeiten unterstützt haben. Ein großer Dank gilt nicht zuletzt auch meinem Freund, der mir während der gesamten Promotionszeit verständnisvoll und geduldig zur Seite stand und mich stets motivierte.

Kurzzusammenfassung

Die gesetzlichen Anforderungen an gesenkte Emissionswerte für Neufahrzeuge bis zum Jahr 2021 treiben die Leichtbaubestrebungen der Automobilindustrie voran. Dabei steht vor allem die Substitution von Stahl durch Faserverbundkunststoff im Fokus. Der Trend für die Großserie liegt im Bereich des faserverstärkten Spritzgusses mit Organoblech. Um eine alternative Entwicklung voranzutreiben, die den Anforderungen der Serie entspricht, wird im Rahmen dieser Arbeit eine gitterartige Verstärkungsvariante für die Automobilindustrie entwickelt. Die Gittergewebe bestehen aus Glasfasern mit unterschiedlichen Gitterabständen, sodass ein Durchströmen und Umfließen des Gitters mit Matrixmaterial im Spritzguss ermöglicht wird. Die systematische Entwicklung unterteilt sich in die eindimensionale Verarbeitung innerhalb einer Plattengeometrie, die zweidimensionale Umformung über einen Werkzeugstempel und die dreidimensionale Fertigung im Bauteil. Dabei werden Abhängigkeiten von Gewebeausrichtung, Materialdopplung und Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Verarbeitung der Gitter in einem Serienbauteil wird über einen Kunststoffmontageträger abgebildet. Durch ausgewählte freigaberelevante Bauteilprüfungen kann die Crashtauglichkeit im Vergleich zum Serienbauteil nachgewiesen werden.

Abstract

New statutory requirements regarding emissions for new cars up to 2021 lead to new developments in the field of light weight solutions. In the automotive industry there is a focus on the substitution of steel by fibre reinforced plastics. Current lightweight applications are based on injection molding in combination with organo sheets. In order to create a new innovation, a grid-like reinforcement with glas-fibres is developed due to this thesis. The structure of the grids vary in their distance between the glas-fibres. The grid-structure supports a polymer flow through the fibres and mechanical linkage between matrix material and glass fibre fabric. First step of development is to overmold the fabric in a simple plate geometry. The second step shows the possibilities of forming via stamping tool. The last step contains the processing of the fabric due to injection molding. The research deals with the influence of the orientations of the fabrics, double layers and process parameters on mechanical properties. For the serial application a mounting bracket is chosen. In comparison to the serial part the crash capability of the developed part can be proved by different, selected trial runs.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
1.3	Aufbau der Arbeit	8
2	Stand der Kenntnisse	11
2.1	Rechtliche Leichtbauvoraussetzungen	11
2.2	Forschungsschwerpunkte und Benchmark	12
2.3	Definition Faserverbundkunststoffe	18
2.4	Matrixsysteme für Faserverbunde	19
2.5	Verstärkungsfasern	23
2.5.1	Aramidfaser	24
2.5.2	Kohlenstofffaser	25
2.5.3	Glasfaser	26
2.5.4	Naturfaser	26
2.6	Halbzeuge	27
2.6.1	Gerichtete flächige Halbzeuge	28
2.6.2	Vorimprägnierte flächige Halbzeuge	31
2.6.3	Einbringen von Faserverstärkungen - Tailored Fibre Placement	33
2.7	Beschreibung der auftretenden Grenzflächen	33
2.7.1	Ausrüstung der Verstärkungsfasern am Beispiel der Glasfaser	34
2.7.2	Grenzfläche zwischen Faser und Matrix	35
2.8	Grundlegende Verarbeitungsverfahren für Faserverbunde	38
2.8.1	Spritzgießen	39
2.8.2	In Mould Forming	41
2.8.3	Spritzgießtechnische Direktimprägnierung	42
3	Kunststoffmontageträger Tiguan	43
3.1	Bauteilbeschreibung	43
3.2	Bauteilverhalten im Crash	44
3.3	Metalleinleger als Versteifungselement der Versagenszone	45
3.4	Verhalten von faserverstärkten Kunststoffen im Crash	48
4	Materialauswahlkonzept und Methoden	51
4.1	Material	51
4.1.1	Verstärkungsfasern	51

4.1.2 Matrix.....	53
4.2 Methoden	54
4.2.1 Charakterisierung der Verstärkungsfasern.....	58
4.2.2 Charakterisierung der Gittergewebe	66
4.2.3 Herstellung der Musterplatten.....	72
4.2.4 Charakterisierung der Musterplatten.....	76
4.2.5 Umsetzung in das Bauteil KUM	82
4.2.6 Konzeptnachweis am Bauteil.....	83
5 Wissenschaftliche Betrachtung der Werkstoff-, Prozess- und Bauteilzusammenhänge	89
5.1 Ergebnisse der Materialselektion und Eigenschaftscharakterisierung	89
5.1.1 Charakterisierung der Faserbeschaffenheit.....	90
5.1.2 Charakterisierung der Faser-Matrix Interaktion	92
5.1.3 Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften	96
5.1.4 Beurteilung des Nutzungspotentials der Verstärkungsfasern	103
5.2 Ermittlung des Verarbeitungsfensters und Darstellung der Eigenschaftscharakteristik von Gittergeweben.....	108
5.2.1 Thermische Analyse mittels TGA und DSC.....	109
5.2.2 Ermittlung der Drapierfähigkeit.....	112
5.2.3 Gewebezugfestigkeit.....	119
5.2.4 Charakterisierung der Roving-Matrix Interaktion	122
5.2.5 Beurteilung der Eigenschaftscharakteristik von Gittergeweben.....	125
5.3 Erkenntnisse aus der Musterplattenherstellung	128
5.3.1 Musterungsauffälligkeiten mit einfacher und doppelter Lage	129
5.3.2 Einfluss der Angussarten auf die mechanischen Eigenschaften	132
5.3.3 Einfluss von Gewebeausrichtung, –dopplung und TFP-Verstärkung auf die mechanischen Eigenschaften	133
5.3.4 Beurteilung der Erkenntnisse aus der Plattenmusterung	135
5.4 Eigenschaftsbestimmung der gewebeverstärkten Musterplatten.....	136
5.4.1 Thermische und optische Analyse mittels Veraschungsmethode und Makroschliffbildern	137
5.4.2 Statische Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften	139
5.4.3 Dynamische Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften	144
5.4.4 Beurteilung der Eigenschaftsbestimmungen.....	148
5.5 Umsetzung der Gittergewebe in das Bauteil KUM	149
5.5.1 Erarbeitete allgemeine Konstruktionsrichtlinien	150

5.5.2 Faserverbundgerechte Bauteil- und Werkzeugänderung	152
5.5.3 Betrachtung der Formteillfüllung über Moldflow	155
5.5.4 Herstellungsprozess der FVK-KUM.....	156
5.5.5 Beeinflussung des Spritzbilds durch unterschiedliche Parameter	162
5.5.6 Beurteilung der Erkenntnisse aus der KUM-Musterung	164
5.6 Eigenschaftsnachweis der Gittergewebe in freigaberelevanten Bauteilversuchen.....	165
5.6.1 Schlittencrash.....	167
5.6.2 Fanghakenkräfte.....	177
5.6.3 Dauer-Schwingversuch	180
5.6.4 Klimawechseltest	182
5.7 Beurteilung der Gewichts- und Kostenersparnis	183
6 Ganzheitliche Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	185
7 Weiterführende Aufgaben	193
8 Zusammenfassung.....	195

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
BMW	Bayerische Motorenwerke
C-Faser/CF	Carbonfaser/Kohlenstofffaser
CFK	Carbonfaser verstärkter Kunststoff
CO ₂	Carbondioxid
EP	Entwicklungsprüfnorm
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke
FB	Fließbereich
FVK	Faserverbundkunststoff
G-Faser/GF	Glasfaser
GFK	Glasfaser verstärkter Kunststoff
IMF	In Mould Forming
KB	Kristallitschmelzbereich
KUM	Kunststoffmontageträger
MP	Verformungsmesspunkt
ODB	Offset-Deformable-Barrier
OEM	Original Equipment Manufactutrer
PA	Polyamid
PBT	Polybutadien-Styrol
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PmPI	Poly (m-phenylene isophthalamide)
PP	Polypropylen
PPTA	Poly (p-phenylene terephthalamid)
REM	Rasterelektronen Mikroskop
RT	Raumtemperatur
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
SBR	Styrol Butadien Rubber
SG	Spritzguss
Tg	Glasübergangstemperatur
UD	Unidirektional
VW	Volkswagen

ZB	Zersetzungsbereich
ZSB	Zusammenbauteil

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prozentuale Anteile am Gesamtverbrauch eines Fahrzeugs der Kompaktklasse, modifiziert [3]	2
Abb. 2: Entwicklung VW Golf; Generation 1 – 7 mit zugehörigem Gewicht, modifiziert [4]	2
Abb. 3: Leichtbauentwicklung – Zusammenhang zwischen Kosten, Gewicht und Leichtbaugrad [8]	4
Abb. 4: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur	10
Abb. 5: Gewichtsbasierter EU-Richtwert mit entsprechenden Flottenwerten der Hersteller – Stand 2014 [12]	11
Abb. 6: CFK-Komponenten des VW XL1 [24]	15
Abb. 7: Aufbau von Faserverbundkunststoffen, modifiziert [36]	19
Abb. 8: Schematische Darstellung der Polymerkettenstruktur; amorph (links) und teilkristallin (rechts)	19
Abb. 9: Polymerisation von Polypropylen (isotaktisch)	20
Abb. 10: Zugfestigkeit σ und Bruchdehnung ε eines teilkristallinen Thermoplasts über der Temperatur T [41]	21
Abb. 11: Einfluss der Temperatur auf die Schlagzähigkeit verschiedener Hostacom-Typen (nach ISO 179), modifiziert [42]	22
Abb. 12: Unterteilung von Verstärkungsfasern nach Schürmann, modifiziert [34]	23
Abb. 13: Chemischer Aufbau Aramidfaser, modifiziert [35]	24
Abb. 14: Chemischer Aufbau Graphitstruktur	25
Abb. 15: Schematischer Aufbau einer Glasfaser, modifiziert [38]	26
Abb. 16: Zellulosemolekül, modifiziert [38]	27
Abb. 17: Verschiedene Textilglaserzeugnisse, modifiziert [35]	28
Abb. 18: Schema eines UD-Geleges [36]	28
Abb. 19: Schema unterschiedlicher Bindungen: a) Leinwandbindung, b) Köperbindung, c) Atlasbindung [36]	29
Abb. 20: Schema einer Dreherbindung [36]	31
Abb. 21: Organoblechherstellung über beheizte Doppelbandpresse, modifiziert [48]	32
Abb. 22: Adhäsionsmechanismen, modifiziert [45]	35
Abb. 23: Schematischer Glasfaseraufbau mit Hydroxylgruppen an der Oberfläche, modifiziert [45]	36
Abb. 24: Hydrolyse von Aminopropyltriethoxysilan	36

Abb. 25: Schematische Glasfaseroberfläche mit aliphatischen Aminen als Haftvermittler, modifiziert [45]	37
Abb. 26: Ausbildung einer kovalenten Bindung zwischen MSA-gepfropftem PP und dem Aminosilan einer Glasfaserschlichte, modifiziert [51]	37
Abb. 27: Faservolumengehalte verschiedener FVK-Verfahren, modifiziert [53]	38
Abb. 28: FVK-Verfahren Wirtschaftlichkeit, modifiziert [53]	39
Abb. 29: Aufbau einer Spritzgussmaschine, modifiziert [55]	40
Abb. 30: Ablauf Spritzzyklus, modifiziert [56]	41
Abb. 31: KUM Tiguan mit Metalleinleger und Crashsensor [59]	43
Abb. 32: Zeitschema der Airbagauslösung beim Frontcrash, modifiziert [63]	45
Abb. 33: Aufprallhöhe Barriere im ODB-Crash mit KUM-ZSB; Isoansicht (links) und Seitenansicht mit potenzieller Versagenszone (rechts) [59]	46
Abb. 34: Entstehende Spannungen im KUM (mit und ohne Einleger) bei einer frontalen Belastung von 2750 N [59]	46
Abb. 35: Schema der Entwicklungsbereiche des Gittergewebes	47
Abb. 36: Kraft-Deformationskurve eines FVK-Elements (links) [66] und eines Stahlelements (rechts) [67]	49
Abb. 37: Versagensarten von Faser-Kunststoff-Verbunden, modifiziert [61]	50
Abb. 38: Schema der Wechselwirkungsbereiche mit übergeordneten Verknüpfungen	57
Abb. 39: Schematische Darstellung einer Thermowaage, modifiziert [77]	59
Abb. 40: TGA Aufheizkurve	60
Abb. 41: Benetzungsschema einer Faser nach der Wilhelmy-Methode	64
Abb. 42: Compression Shear Device (CSD), modifiziert [81]	66
Abb. 43: Prinzipskizze Drapetest mit Probekörperaufnahme, Umformungskörper und Kamersystemen, modifiziert [84]	69
Abb. 44: Scherrahmen mit Gewebe PP-3x3(PUK, TU Clausthal); Foto von Gittergewebe (links) und Schema (rechts)	70
Abb. 45: Prozentuales Scherkraftabweichungs-Diagramm, modifiziert [85]	71
Abb. 46: Lasergesintertes 3D-Modell mit beispielhaftem Einleger (orange)	71
Abb. 47: Spritzgussmaschine KM 650t (links) und eingebautes Normalienwerkzeug (rechts) ...	72
Abb. 48: Schema der Musterplatten mit unterschiedlichen Angussarten [36]	73
Abb. 49: Probenentnahmeplan für eine Musterplatte mit Filmanguss, Bemaßung in mm [36] ...	74
Abb. 50: Carbonverstärkung auf Glasgittergewebe; aufgebracht durch TFP in 0°, 45°, 90° Ausrichtung; Rovingabstand jeweils 1mm	75

Abb. 51: Prinzipskizze einer Faserbündel-Pull-Out Probe [36].....	77
Abb. 52: Metallische Einlegerplatte und Magnetplatte zur Erstellung der Faserbündelauszugsproben [36].....	77
Abb. 53: Angespritzte Auszugprobe mit vier Faserbündeln (links) und Detailaufnahme eines angespritzten Faserbündels (rechts) [36].....	78
Abb. 54: Faserbündelauszugprobe (links), Auszugprobe mit aufgetragenen Aufklebern (mitte) und Einspannung der Probe im Auszugversuch (rechts) [36].....	78
Abb. 55: Schliffebenen bei Einzelfaser- und Plattenprüfung [36]	80
Abb. 56: Schema der Werkzeugkavität mit Formrahmen (grau), Wechseleinsatz (türkis) und Kontureinsätzen(orange)	83
Abb. 57: Schematischer Ablauf der dynamischen Prüfkompone (oben) und Verformungsmesspunkte (MP) am KUM (unten) [59].....	85
Abb. 58: Temperaturverlauf Klimawechseltest	86
Abb. 59: Crashanlage mit entkoppelter Crashmesswand [59]	88
Abb. 60: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Definition der Versagenszonen, Materialelektion und Erstellung der Einlegervarianten.....	89
Abb. 61: Mikroskopaufnahmen Draufsicht; Vergrößerung 2000 x [74]	91
Abb. 62: Beispiele für Kraft-Weg-Diagramme aus Single-Fibre Pull-Out Versuch – links Jute, rechts Carbon 1 [74].....	95
Abb. 63: Mikroskopaufnahmen nach Single-Fibre Pull-Out, Vergrößerung 2000 x [74]	96
Abb. 64: Weibull-Diagramme der Einzelfasern [74]	100
Abb. 65: Schlagzähigkeit im UD-Verbund mit unterschiedlichen Verstärkungsfasern, modifiziert [74]	102
Abb. 66: Spezifische Faserkennwerte (einzeln und im UD-Verbund), normiert, für Fasern mit thermoplastgeeigneter Schichte (oben) und duroplastgeeigneter Schichte (unten)	106
Abb. 67: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Festlegung der minimalen und maximalen Drapier-radien und Überprüfung der Übertragbarkeit auf komplexe Geometrien...	108
Abb. 68: TGA-Kurven SBR-5x5 (oben), PP-3x3 und PP6x6 (unten)	110
Abb. 69: Preform-Bereich für Gittergewebe mit SBR-Beschichtung und PP-Infusion [36]	112
Abb. 70: Kraftaufwendung für die Drapierung von PP-3x3 und PP-6x6 mittels Drapetest, modifiziert [96]	113
Abb. 71: Auftretende Scherwinkel bei Drapierung zw. 0-80 mm von PP-3x3, gemessen in 360°, modifiziert [96]	113

Abb. 72: Maximale Gitterlochbreite bei Drapierung zw. 0-80 mm von PP-3x3, gemessen in 360°, modifiziert [96]	114
Abb. 73: Maximale Faltenhöhe bei Drapierung zw. 0-80 mm von PP-3x3, gemessen in 360°, modifiziert [96]	115
Abb. 74: Prozentuale Scherkraftabweichung am Beispiel Gittergewebe PP-3x3 bei -45°	115
Abb. 75: Gescherte Gittergewebe; SBR5x5 (links), PP-3x3 (mitte), PP-6x6 (rechts).....	116
Abb. 76: Darstellung der Zusammenhänge Scherwinkel-Scherkraft-Längenänderung im dreidimensionalen Raum.....	117
Abb. 77: Drapierradius über der Verschiebung in Kettrichtung, ohne Vorwärmung	119
Abb. 78: Kraft-/Dehnungsdiagramm ermittelt nach DIN EN ISO 13934-1	120
Abb. 79: Exemplarischer Kraft-Weg-Verlauf beim Faserbündelauszug [36].....	123
Abb. 80: Faserbündelauszugskraft für jeweils Kette und Schuss	124
Abb. 81: Makroschliffbilder des Gewebes mit SBR-Infusion; Kettfaden (oben) und Schussfaden (unten) [36].....	125
Abb. 82: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Verarbeitung und Handling im 1D-Plattenwerkzeug und Untersuchung der Kennwerterhöhung	128
Abb. 83: Platte mit einlagigem SBR-5x5 Gewebe; Foto (links) und CT-Aufnahme (rechts) [59]	130
Abb. 84: Ausschnitt Doppelgewebelage (links) und verzugsfreie Platte 0/90 ° (rechts) [47]	130
Abb. 85: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit bei doppelter Gewebelage und +/- 45° Ausrichtung;	131
Abb. 86: Einfluss der Angussarten mit Gewebeausrichtung KA und SI am Beispiel des Zugversuchs [47].....	132
Abb. 87: Abhängigkeit der Gewebeausrichtung an Platten mit Punktanguss am Beispiel des Zugversuchs [47].....	134
Abb. 88: Vergleich des Verstärkungseffekts von Matrix, einfachem Gitter (KI) und TFP-verstärktem Gitter (KI+TFP) anhand des Zug- und Durchstoßversuchs	135
Abb. 89: Veraschungsmethode – Proben vor und nach der Veraschung [36]	137
Abb. 90: Makroschliffbilder – Faserverstärkte Platten in der Übersicht (oben) und im Detail (unten) [36].....	138
Abb. 91: Zugversuch – Vergleich der Verstärkungswirkung unterschiedlicher Gittergewebe ..	140
Abb. 92: Zugprüfung – Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Verbundproben	141
Abb. 93: Vergleich der Verstärkungswirkung unterschiedlich belasteter Gittergewebe im Biegeversuch	142

Abb. 94: Biegeprüfung – Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Probekörper	142
Abb. 95: Kurzfaserorientierung in den Musterplatten [36].....	143
Abb. 96: Biegeversuch – exemplarischer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (links) und Streckspannung und E-Modul (rechts) [36]	143
Abb. 97: Schlagzähigkeit – Verstärkungswirkung der Fasereinleger auf schlagartige Belastung [47]	145
Abb. 98: Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Probekörper nach Schlagzähigkeitsprüfung [47]	145
Abb. 99: Durchstoßversuch – Kraft-Weg Verlauf für Platten aus reiner Matrix und mit PP-3x3 Verstärkung	146
Abb. 100: Durchstoßversuch – Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Probekörper	148
Abb. 101: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Änderung des Einlegebereichs in FVK-Kontur und Fertigung von gittergewebeverstärkten KUM für Freigabeproofungen.....	149
Abb. 102: Bauteiländerungen – Gegenüberstellung von Serie und FVK in drei Ansichten [59]	154
Abb. 103: Moldflow – Fließfrontverlauf im Bereich des Seiten-/Obergurts mit Anspritzpunkt Düse 1 [59].....	155
Abb. 104: Moldflow – Druckverlauf am Umschaltppunkt (links) und Verzug (rechts) [59]	156
Abb. 105: Schematische Abbildung der Verfahrensschritte des Preformprozesses	157
Abb. 106: Positionierung der Fasereinleger im Spritzgusswerkzeug; schematische Darstellung (oben) und Detailaufnahme im Werkzeug (unten).....	158
Abb. 107: Änderungen der Einlegerzuschnitte; 1., 2., 3. Musterung.....	162
Abb. 108: Verschiebungen der Gittereinleger im dreidimensionalen Raum	164
Abb. 109: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Überprüfung der Performance eines gittergewebeverstärkten KUM unter anderem über die dynamische Belastung im Schlittencrash	166
Abb. 110: KUM-ZSB mit Langlochverbindungsstelle [59].....	167
Abb. 111: Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am Serien-KUM	169
Abb. 112: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am Serien-KUM.....	170
Abb. 113: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung von Metallverstärkung, SBR-5x5 und Rollbock	171
Abb. 114: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am KUM mit SBR-5x5.....	171

Abb. 115: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung von Metallverstärkung und PP-6x6 (breit und schmal).....	172
Abb. 116: KUM mit PP-6x6 Einleger (breit) und ausgerissenem Anschraubpunkt nach Crash	172
Abb. 117: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am KUM mit PP-6x6 (breit und schmal).....	173
Abb. 118: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung von Metallverstärkung und PP-3x3 (breit und schmal).....	174
Abb. 119: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am KUM mit PP-3x3 (breit und schmal).....	175
Abb. 120: Fanghakenkräfte statisch bestimmt für MP 1 bei -30°C, RT, 85°C; Prozentualer Anteil der bleibenden Verformung an der Gesamtverformung für FVK-KUM und Referenz ohne Einleger	178
Abb. 121: Fanghakenkräfte statisch bestimmt für MP 6 und MP 7 bei 85°C; Prozentualer Anteil der bleibenden Verformung an der Gesamtverformung für FVK-KUM und Referenz ohne Einleger	179
Abb. 122: Fanghakenkräfte dynamisch bestimmt an einem FVK-KUM für MP 1 und MP 2 bei 85°C.....	180
Abb. 123: Ablösung des PP-3x3 Gittergewebes beim Dauerschwingversuch; Übersicht (links) und Detail am oberen Anschraubpunkt (rechts).....	181
Abb. 124: Ablösung des PP-3x3 Gittergewebes in der Klimakammer; Übersicht (links) und Detail (rechts).....	182
Abb. 125: Wirkungsgrad der Schlichte, ermittelt aus Auszugkraft bezogen auf den prozentualen Schlichtegehalt	186
Abb. 126: Spezifische mechanische Kennwerte, bezogen auf den Faseranteil, normiert, für Matrix, SBR-5x5, PP-3x3, PP-6x6 verstärkte Platten.....	188
Abb. 127: Schematischer Prozessablauf der Herstellung von FVK-KUM, modifiziert [36]	190

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Eigenschaften unterschiedlicher PP-Sorten mit verschiedenen Zusatzstoffen [39] [42] [43]	23
Tab. 2: Kosten herkömmlicher Verstärkungsfasern in €/kg [44]	24
Tab. 3: Übersicht der Struktureigenschaften nach Cherif (0 \triangleq gering; ++ \triangleq hoch) [45]	30
Tab. 4: Mögliche Zusammensetzung einer Glasfaserschlichte für Polypropylen [50]	35
Tab. 5: Anforderungen an mechanische Kennwerte für KUM nach TL52625	44
Tab. 6: Kennwerte untersuchter Verstärkungsfasern [68] [69] [70] [71] [72]	52
Tab. 7: Materialkennwerte PP-GF30 [73]	54
Tab. 8: Angewandte Faserdichten [74]	60
Tab. 9: Herstellungsparameter für Einzelfasermodellverbunde [74]	61
Tab. 10: Parameter der Matrix und Verstärkungsfasern zur Berechnung der Kennwerte [79]	63
Tab. 11: Materialzusammenstellungen der Verstärkungsfasern und des PP-Filamentgarns	64
Tab. 12: Pressprogramm für UD-Platten, modifiziert [74]	65
Tab. 13: Kreuzversuchsplan der Plattenmusterung mit Faktoren und Ausprägungen [47]	73
Tab. 14: Konfiguration der Gewebereinleger	74
Tab. 15: Schleif- und Polierparameter	79
Tab. 16: Ablaufplan Dauer-Schwingversuch ZSB Frontend	86
Tab. 17: Faserdurchmesser bestimmt durch optische Lichtmikroskopie und Feuchtigkeits-/Schlichtegehalt [74]	90
Tab. 18: Kontaktwinkelmessung ermittelt über den Fortschrittswinkel [74]	92
Tab. 19: Scheinbare und lokale Grenzflächenscherfestigkeit ermittelt über Single-Fibre Pull-Out [74]	94
Tab. 20: Einzelfaserzugfestigkeit und 1./2. Modul ermittelt über Einzelfaserzugversuch [74]	97
Tab. 21: Quer- und Längszugfestigkeiten von UD-Verbunden	101
Tab. 22: Druckscherung von UD-Verbunden	103
Tab. 23: Rahmendaten der verwendeten Gittergewebe 1 - 3	107
Tab. 24: Thermische Kennwerte der Fasereinleger in °C ermittelt über TGA und DSC	111
Tab. 25: Scherkennwerte der Gittergewebe über Scherrahmenversuch	118
Tab. 26: Errechnete Fläche der Gittergewebe in Zugprobe	121
Tab. 27: Vergleich Zugfestigkeiten von Einzelfasern und Gittergeweben (klimatisiert)	122
Tab. 28: Übersicht der Gewebeeigenschaften im Vergleich (- \triangleq gering; ++ \triangleq hoch)	127
Tab. 29: Glasfaseranteil unterschiedlich verstärkter Platten [36]	137
Tab. 30: Maximale Durchstoßkraft im Durchstoßversuch	147

Tab. 31: Allgemeine Konstruktionsrichtlinien zur Erstellung von FVK-Bauteilen mit Gittergeweben	151
Tab. 32: Versuchsplan der FVK-KUM Musterung mit Faktoren und Ausprägungen.....	159
Tab. 33: Gewicht der Einleger aus unterschiedlichen Gittergeweben	162
Tab. 34: Verschiebungen der Gewebereinleger (schmal) in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Einspritzgeschwindigkeit	163
Tab. 35: Kosten- und Gewichtsvergleich eines KUM in unterschiedlichen Konfigurationen....	183

1 Einleitung

Die Schnelllebigkeit der Gesellschaft sowie die stetig steigenden Umweltbelastungen verlangen nach immer mehr alternativen Mobilitätskonzepten, wie beispielsweise der Elektromobilität. Dabei ist ein hoher Leichtbauanteil für E-Fahrzeuge gleichbedeutend wichtig, wie eine leistungsfähige Batterie. Aktuell setzen die *Bayerischen Motorenwerke (BMW)* mit dem *i3* den Maßstab für Leichtbauautomobile mit Elektroantrieb. Das größte Leichtbaupotential wird im *i3* mit der endlosfaserverstärkten Fahrgastzelle ausgeschöpft. Aber auch der Einsatz von Aluminium und Leichtbaustählen im Karosseriebau kennzeichnet eine der maßgeblichen Leichtbauentwicklungen. Die Anwendung von Multi-Material-Design setzt auf spezifische Werkstoffeigenschaften und konstruktive Weiterentwicklung, um optimale Systemlösungen zu generieren und Drop-In Lösungen zu vermeiden [1].

Die Bezeichnung „Leichtbau“ gilt als Synonym für den ressourceneffizienten Einsatz von Materialien zur Erfüllung der konstruktiven und festigkeitsbestimmenden Konstruktion. Die intelligente Kombination von Werkstoffen gepaart mit neuen konstruktiven Möglichkeiten und unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren macht den Leichtbau zu einem unverzichtbaren, zukunftsweisenden Gut. Bei jeder Leichtbauentwicklung gilt es Parameter wie Gewicht, Kosten, Verfügbarkeit, Innovationsgrad und Recycling in ihrer Gesamtheit und gegenseitigen Abhängigkeit zu bewerten und ein vertretbares Kosten/Nutzen-Verhältnis für die Industrie zu generieren. Nur so ist eine Umsetzung in Gebieten wie Luft- und Raumfahrt oder im Automobilsektor möglich [1]. Letzteren drängen steigende Gesetzesanforderungen sowie erhöhte Forderungen an Sicherheit und Komfort zu aktivem Handeln in Bezug auf Entwicklung und fertigungsgerechter Integration von Leichtbau. Beispielsweise muss der CO₂-Flottenausstoß von Neuwagen bis zum Jahr 2021 auf 95 g CO₂/km gegenüber dem Grenzwert aus 2015 von 120 g/km reduziert werden [2]. In Abb. 1 sind die prozentualen Anteile einzelner Komponenten am Gesamtverbrauch eines Fahrzeugs der Kompaktklasse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Gewicht mit 23 % knapp ein Viertel des Gesamtverbrauchs ausmacht. Des Weiteren gewinnen alternativ angetriebene Fahrzeuge fortlaufend an Bedeutung. Ein maßgebliches Entwicklungsziel von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen besteht in der Reichweitenerhöhung, wobei das Fahrzeuggewicht einen entscheidenden Einflussfaktor darstellt [3].

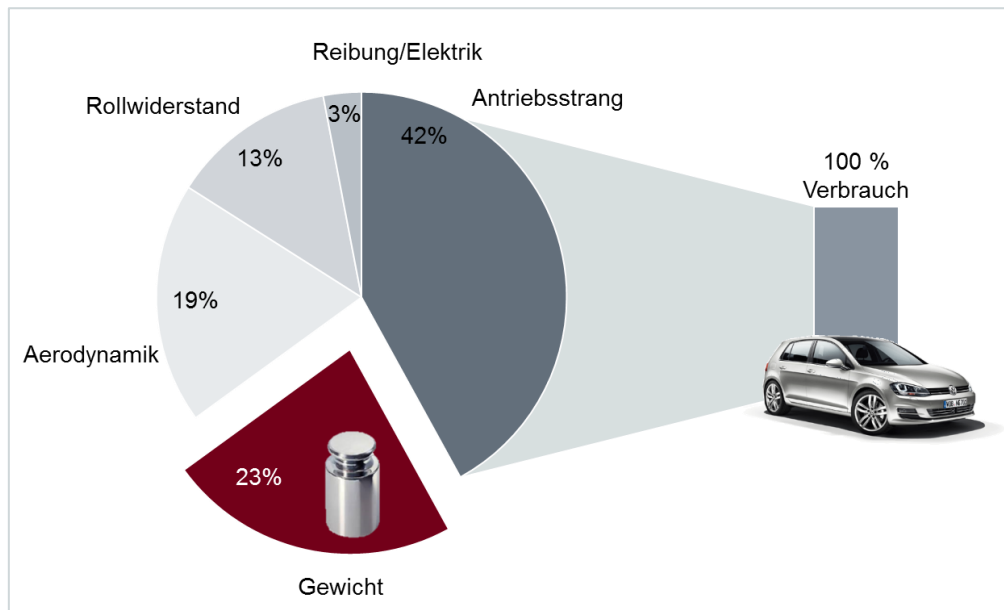


Abb. 1: Prozentuale Anteile am Gesamtverbrauch eines Fahrzeugs der Kompaktklasse, modifiziert [3]

Die Abb. 2 zeigt anhand des VW Golf die Gewichtsentwicklung über die einzelnen Generationen. Es ist zu erkennen, dass sich das Gewicht der Fahrzeuge sukzessive erhöht. Im Vergleich zu der ersten Generation wiegt der Golf der siebten Generation das Doppelte. Neben der generellen Vergrößerung der Automobile, ist diese Tendenz der erhöhten Forderung an Sicherheit, Komfort und Elektronik zu zuschreiben.



Abb. 2: Entwicklung VW Golf; Generation 1 – 7 mit zugehörigem Gewicht, modifiziert [4]

Um das Gewicht im Fahrzeug und somit den Gesamtverbrauch zu reduzieren, kommen drei wesentliche Arten von Leichtbau zum Einsatz:

- Konzeptleichtbau
- Formleichtbau
- Stoffleichtbau.

Der Konzeptleichtbau befasst sich mit der Entwicklung von Funktionsintegrationen, um das Gewicht von Strukturbauteilen und einzelnen Komponenten zu senken. Es stehen sowohl Teilsysteme als auch das Gesamtsystem im Fokus. Der Formleichtbau stützt sich auf Topologieoptimierungen, mit dem Ziel, bekannte Strukturen an neue Anforderungen optimal anzupassen. Dazu sind Geometrieänderungen bei gleichbleibendem Bauraum vorzunehmen, die eine optimale Kraftverteilung entlang der Hauptlastpfade im Bauteil generieren. Der Stoffleichtbau substituiert herkömmliche Werkstoffe durch Materialien mit geringerer Dichte bei vergleichbaren oder besseren Eigenschaften. Es ist darauf zu achten, Geometrien und Herstellungsverfahren des Bauteils aufeinander abzustimmen [5].

In Bezug auf den Einsatz unterschiedlicher Materialien, gibt es die Möglichkeit die Karosserie über Materialmix und Leichtbaustähle leichter zu gestalten. Für die Kunststoffkomponenten im Automobil bieten hybride Materialien, wie faserverstärkte Kunststoffe großes Potential. Diese können über angepasste Faserauslegung speziell an die Belastung des Bauteils angepasst werden und weisen so hohe mechanische Eigenschaften bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion gegenüber klassischen Materialien auf. Im Spritzgussverfahren werden bereits kurzfaserverstärkte Kunststoffe für automobiler Anwendungen in Serie verarbeitet. Das Verfahren bietet neben einer hohen gestalterischen Freiheit und einer möglichen Funktionsintegration durch Integralbauweise kurze und wirtschaftliche Prozesszeiten [6]. Endlosfaserverstärkte Kunststoffe werden hingegen meist mit duroplastischen Matrixsystemen hergestellt, die den Nachteil einer langen Aushärtezeit haben und somit nur bedingt großserientauglich sind. Verglichen mit kurz- und langfaserverstärkten Thermoplasten weisen diese jedoch erheblich bessere mechanische Eigenschaften auf [7].

1.1 Motivation

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit soll einen Beitrag zu der Leichtbauquote und Kostenstruktur im Automobil leisten. Ein hoher Leichtbauanteil ist essenziell für die Reduzierung des Fahrzeuggewichts und steht in direktem Zusammenhang mit dem Gesamtverbrauch und somit dem CO₂-Ausstoß. Die verfolgten Lösungsansätze sind, neben der Formoptimierung, der Einsatz von leichten und neuen Materialien. Prädestiniert dafür sind Endlosfaser-Verstärkungen bzw.

Faserverbundkunststoffe (FVK). Durch die geringe Dichte, die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten und Materialpaarungen kann eine alternative und wirtschaftliche Verstärkung zu bspw. Metalleinlegern geschaffen werden. Für ein Upscaling auf Großserienniveau ist es unabdingbar ein entsprechendes Verarbeitungsverfahren für FVK zu wählen, das den Zykluszeitanforderungen einer Großserie genügt. Weiterhin muss bei einer getakteten Verarbeitung die Aufmachung des Faserverbunds stabil gegenüber Verarbeitungsgeschwindigkeiten, Temperaturen und Drücken sein. Ebenso relevant ist die Materialperformance im Einsatzbereich des FVK, die individuell auf die Anforderungen des Bauteils abgestimmt werden muss. Abb. 3 zeigt die Prämissen für einen wirtschaftlich optimierten Leichtbau im Zusammenhang. Es ist zu sehen, dass der Bereich des optimierten Leichtbaus einen Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Kostenfaktoren und dem Gewicht darstellt, wobei möglichst geringe Gesamtkosten den dominierenden Faktor bilden.

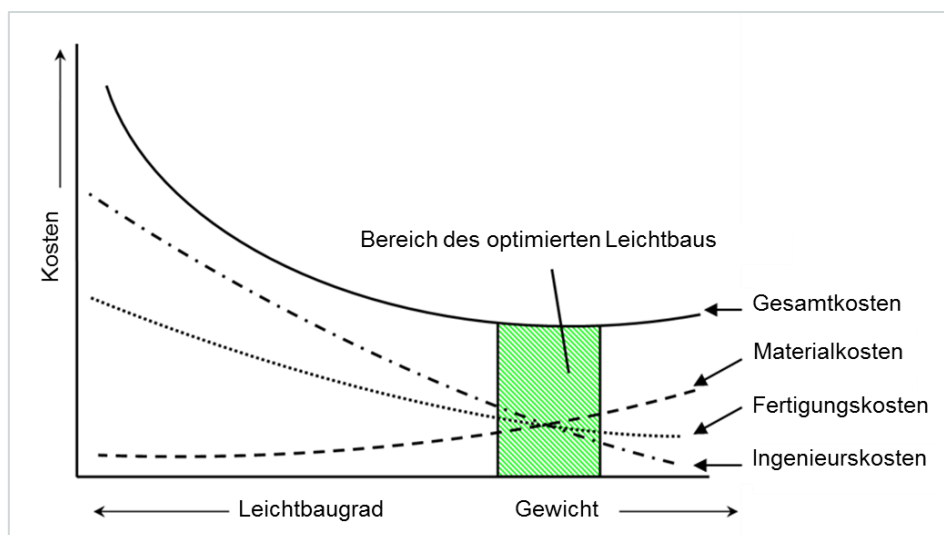


Abb. 3: Leichtbauentwicklung – Zusammenhang zwischen Kosten, Gewicht und Leichtbaugrad [8]

Aktuelle Entwicklungen der Industrie zeigen, dass eine Verarbeitung von thermoplastischen FVK (Organoblech) im Spritzguss (SG) im Kleinserienmaßstab möglich ist. Zusätzlich ist ein vorgeschalteter Heizprozess notwendig, der die Anbindung an die SG-Matrix ermöglicht, jedoch einen zeit- und kostenintensiven Mehraufwand bedeutet. Weiterhin zeigen Forschungsarbeiten, dass eine Direktimprägnierung durch einen pulsierenden Schmelzeintrag möglich ist [9]. Dieses Verfahren erhöht die Zykluszeit und benötigt einen speziellen Werkzeugaufbau. Um eine durchgängige Imprägnierung aus dem Textil heraus zu erzeugen, ist die Verwendung von Hybrid-Rovings, sog. Commingled-Yarns, ebenfalls ein gangbarer Weg. Hier gestaltet sich die Rekonsoolidierung und Temperaturführung im Spritzgussprozess als Herausforderung [10]. Um die auf-

wändigen Prozesse der Imprägnierung, Rekonsolidierung und des Vorheizens zu umgehen und sich von den flächig geschlossenen Textilien zu lösen, ist eine Umspritzung und/oder mechanische Verkrallung eines permeablen Faserverbunds erforderlich. Der Begriff „permeabel“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Aufbau des Faserverbunds so grob strukturiert sein muss, dass er von einer Kunststoffschmelze mit $\eta = 10^1\text{-}10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ [11] durchflossen werden kann. Je nach Aufmachung der Filamente im Verbund, ist eine durchgängige Imprägnierung und Umschließung jedes einzelnen Filaments mit Matrix erstrebenswert. Gleichsam müssen die Stabilität des Faserverbunds sowie die wiederholbare Positionierung im fertigen Bauteil sichergestellt werden. Hierzu werden bislang grobstrukturierte, gewirkte Endlosfasergelege verarbeitet, welche zuvor einer Konsolidierung unterzogen werden. Diese Gelege sind in der Verarbeitung im Spritzguss durch niedrige bis mittlere Spritzdrücke und dem vorgeschalteten Verfahrensschritt beschränkt.

Aus dem aktuellen Stand der Technik und den Forschungsschwerpunkten (vgl. Kapitel 2.2) ergibt sich die Motivation, grobstrukturierte und infundierte Halbzeuge als Endlosfaserverstärkung im Spritzguss zu verarbeiten. Der Neuheitsgrad gestaltet sich in der Kombination aus Verarbeitungsprozess und der Textilform Gittergewebe. Dieses ist wirtschaftlich herstellbar und bietet eine ausreichende Handlingsstabilität für die Prozessübergaben. Das Gewebe soll weiterhin den Spritzgussbedingungen (Temperatur, Druck, Einspritzgeschwindigkeit) eines kontinuierlichen Prozesses standhalten und ohne zusätzliche Aufheizung des Gittergewebes verarbeitbar sein. In der Struktur müssen die bereits erwähnten Anforderungen der Permeabilität gegeben sein. Zusätzlich liegt eine Erhöhung der mechanischen Kennwerte bei kleinstmöglichem Einsatz von Endlosfasern im Fokus.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden wissenschaftlichen Abhandlung ist es, die Leistungsfähigkeit eines Faserverbundmaterials zu entwickeln und für den beispielhaften Einsatz innerhalb eines Kunststoffmontageträgers (KUM) ausreichend zu qualifizieren. Dabei soll das Faserverbundmaterial die Versteifungseigenschaften zweier seitlicher Metallverstärkungen übernehmen und somit die Metalleinleger substituieren. Die Integration von grobstrukturierten textilen Gittergeweben im Spritzgussprozess offenbart eine Möglichkeit, die Materialeigenschaften im Verbund mit geringem Endlosfasereinsatz so zu erhöhen, dass geforderte Eigenschaftsprofile erreicht und wirtschaftliche Verarbeitungszeiten im Spritzgussprozess umgesetzt werden können. Handlungsfelder entstehen aus den hohen Belastungen des Gewebes durch den Einspritzprozess sowie einer wiederholbaren Positionierung und vollständigen Imprägnierung/Umflutung durch die Schmelze.

Für eine zielgerichtete Umsetzung wird eine Auswahl potenzieller Verstärkungsfasern getroffen, die den Anforderungen an das Beispielbauteil entsprechen. Die Eignung der Fasern wird unter verschiedensten Aspekten beleuchtet und eine Basisfaser für das Textil definiert. Für die textile Aufmachung ist die Kombination aus Bindungsart und Gitterabstand maßgeblich. Ziel ist es, das Textil für eine Verarbeitung im Spritzguss unter den Prämissen eines Serienprozesses (kurze Zykluszeiten, hohe Einspritzgeschwindigkeiten) zu gestalten. Hierzu gehört ebenfalls das Handlingsverhalten für einen automatisierten Übergabeprozess. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Erarbeitung der Performancesteigerung des Verbunds. Dafür ist die bereits erwähnte Faserauswahl sowie die Haftung der Verbundpartner untereinander substanziell. Zusätzlich kann eine Verkrallung des Textils mit der Spritzgusschmelze zu einer verbesserten Karftübertragung und einer Steigerung der mechanischen Eigenschaften beitragen. Für das genannte Beispielbauteil ist ein Sonderbelastungsfall, ein Fahrzeugcrash, vorgesehen. Demnach ist das Ziel für diesen Gesamtprozess den Faserverbund für eine hochdynamische Belastung zu qualifizieren.

Die Aufgabenstellung umfasst verschiedene Blickwinkel von der eindimensionalen Ebene (Eigenschaften in Plattengeometrie) über die zweidimensionale Ebene (Drapierbarkeit über unterschiedliche Radien) bis zur dreidimensionalen Bauteilebene.

Im ersten Schritt werden potenzielle Verstärkungsfasern grundlegend charakterisiert. Dies beinhaltet optische, physikalische sowie mechanische Untersuchungen. Ebenfalls wird die Faser-Interaktion zu dem Spritzgussmaterial über Auszugsversuche bewertet, um Rückschlüsse auf den späteren Verbund zu ziehen. Anhand der Charakterisierung und der Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte wird eine Faser ausgewählt, die zu einem flächigen Halbzeug verarbeitet wird. Der Gitterabstand orientiert sich an der Viskosität und dem Füllanteil an Kurzfasern in der Spritzgussmatrix. Zusätzlich steht die Minimierung des Endlosfaseranteils bei maximaler Potentialaus-schöpfung im Fokus. Die Bindungsarten werden in Bezug auf Scherbeanspruchung und Wirtschaftlichkeit des Webprozesses ausgewählt. Ebenfalls werden die Kett- und Schussfäden mit zwei verschiedenen Polymeren getränkt, um Unterschiede in der Verbundhaftung zu untersuchen. Hierzu wird ein Faserbündel Pull-Out durchgeführt, um die Haftung zwischen Faserbündel (Roving) und Spritzgussmatrix zu bewerten und Rückschlüsse auf die Kraftübertragung im Verbund zu erzielen. Die Charakterisierung der Gittergewebe erfolgt in Bezug auf ihrer Drapier- und Scherbarkeit sowie der mechanischen Eigenschaften, um eine optimale Abformung in einer 3D-Kontur zu erzielen.

Für die Verarbeitung im SG-Prozess werden zuerst die optimalen Verarbeitungsparameter hinsichtlich Wiederholbarkeit und Zykluszeit untersucht und festgelegt. Dazu werden die Polymerüberzüge thermisch analysiert, um einer Schädigung durch Verarbeitungstemperaturen vor-

zubeugen. Die Grenzflächen werden über Schliffbilder und Mikroskopaufnahmen bewertet. Die Verstärkungswirkung im Verbund wird in einer eindimensionalen Platte hinsichtlich Zug-, Biege-, Schlag- und Durchstoßbelastung untersucht. Zusätzlich werden Platten mit Materialdoppelung und verschiedener Ausrichtung von Geweben gefertigt. Die Varianten mit den besten mechanischen Eigenschaften werden für den Einsatz im Bauteil Kunststoffmontageträger vorgesehen.

Die Implementierung der Gittergewebe in eine komplexe dreidimensionale Geometrie erfolgt anhand des KUM Beispiels und basiert auf den Drapier- und Scherversuchen der Gittergewebe. Die kritischen Radien der KUM-Geometrie werden konstruktiv optimiert, um eine materialschonende Verarbeitung zu gewährleisten. Gleichzeitig sollen eine vereinfachte Geometrie und ein Befestigungskonzept innerhalb des SG-Werkzeugs eine serienfähige Verarbeitung ermöglichen. Die Bemusterungsparameter orientieren sich an den Verarbeitungsparametern auf 1D-Plattenebene und dienen ebenfalls dazu die Übertragbarkeit der Parameter zu überprüfen. Die hergestellten FVK-KUM werden abschließend den intern vorgesehenen Bauteilprüfungen unterzogen und mit der Performance des Serienbauteils verglichen. In diesem Zusammenhang kann die Hypothese gestellt werden, dass bei ausreichender Qualifizierung des Faserverbundmaterials die Übertragbarkeit von 1D-Plattenebene über 2D-Drapierung auf 3D-Bauteilebene gewährleistet ist.

Die Verwendung von grobmaschigen Gittergeweben stellt einen Lösungsansatz dar, der sich von den konventionellen vollflächigen Faserverbundverstärkungen abgrenzt. Es ist zu prüfen, ob ein entsprechender Polymerüberzug/Infusion bei vergleichsweise geringen Materialkosten eine geeignete Mikroimprägnierung sowie eine ausreichende Steifigkeit während des Drapiervorgangs im Werkzeug und dem darauffolgenden Einspritzprozess bietet. Zusätzlich soll der gitterartige Aufbau der Verkrallung der Spritzgussmasse mit dem Endlofasertextil dienen. Weiterhin muss untersucht werden, welchen Verstärkungsgrad die Gittergewebe im Verbund erzeugen und ob sich die Halbzeuge in einen automatisierten Prozess integrieren lassen.

Aufgrund der unzureichenden Kenntnisse von Gittergeweben als Faserverbundverstärkung für Spritzgussbauteile besteht für folgende Fragestellungen der Bedarf an vertiefenden Untersuchungen:

- Besteht eine Notwendigkeit eines Polymerüberzugs/Infusion von Gittergeweben als Spritzgussverstärkung? Welchen Einfluss hätte diese auf die Stabilität des Halbzeugs im Spritzgussprozess und die Grenzflächeninteraktion im Verbund?

-
- Wie ist die Verstärkungswirkung von Gittergeweben auf die Verbundeigenschaften in Abhängigkeit des Fasergehalts?
 - Was für Möglichkeiten und Grenzen gibt es, ein Gittergewebe in den Spritzgussprozess zu integrieren?
 - Ist es möglich, durch einen zielgerichteten minimalen Fasereinsatz und eine optimale Verarbeitung einen ausreichenden Verstärkungserfolg zu erzielen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abb. 4 schematisch dargestellt. Die Abbildung zeigt den systematischen Denkansatz zur Erarbeitung des Substitutionspotentials für die Metalleinleger des KUM. An oberster Stelle und somit im Mittelpunkt der Untersuchungen steht das zuvor genannte und beispielhafte Zielbauteil, der Kunststoffmontageträger des *Tiguans*. Dieses Bauteil verfügt, je nach Art und Dauer der Belastung, über unterschiedliche Versagenszonen. Basierend auf dem Grenzlastfall, dem Frontalaufprall (vgl. Kapitel 3.2), müssen im ersten Schritt die entsprechenden Versagenszonen des Kunststoffmontageträgers festgelegt werden. Dazu wird in einer Simulation (vgl. Kapitel 3.3) eine flächige Last von 2750 N über eine quaderförmige Barriere in den Montageträger eingeleitet. Die auftretenden Spannungen zeigen die stark belasteten Bereiche, in denen das Versagen entsteht. Diese Bereiche werden als Versagenszonen definiert und markieren gleichzeitig die zu verstärkenden Flächen im Bauteil. Die Flächenkontur dient als Vorgabe für die zu drapierenden Radien der Verstärkung.

Der darauffolgende Schritt beschreibt die Materialelektion und Eigenschaftscharakterisierung der potenziellen Verstärkungsfasern. Als Verstärkungsfasern kommen Fasern aus Glas und Kohlenstoff zum Einsatz. Zusätzlich wird eine Naturfaser aus Jute untersucht, um den Nachhaltigkeitsgedanken sowie den Vorteil der geringen Dichte mit aufzunehmen. Die Eigenschaftscharakterisierung dient der Einordnung und Clusterung der Fasern in Bezug auf deren mechanische, physikalische und optische Merkmale. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie die bestehenden Erfahrungen des Textilherstellers, bilden die Entscheidungsgrundlage, auf der das Basismaterial für die Verstärkung ausgewählt wird. Die ausgewählte Verstärkungsfasern (Basismaterial) wird zu groben textilen Gittern verarbeitet. Dabei werden die Gitterabstände sowie die Bindungsart und die Polymerinfusion der Gitter variiert. Die unterschiedlichen Varianten sollen das Verhalten in Bezug auf Verschiebefestigkeit, Drapierbarkeit sowie Permeabilität (vgl. Kapitel 1.1) und Faser-Matrix Interaktion der Gitter untersuchen.

Der weitere Entwicklungsablauf kann in zwei Hauptstränge, die Grundlagenentwicklung und die Bauteilentwicklung, unterteilt werden. Die Grundlagenentwicklung beinhaltet die Verarbeitung

der Gitterverstärkungen zu FVK-Platten sowie deren Charakterisierung. Die Verarbeitung erfolgt in einem einfachen Plattenwerkzeug auf eindimensionaler Ebene. In diesem Schritt werden das Handling sowie die Stabilität der Gitterstruktur gegenüber dem Spritzgussprozess bewertet und die optimalen Verarbeitungsparameter ermittelt. Die bemusterten Platten werden einer umfassenden Charakterisierung (statische, dynamische Belastung, CT) unterzogen, die Aufschluss über das Verhalten des Verbunds und die Verstärkungswirkung der Fasern gibt. Es werden zusätzlich Abhängigkeiten der Einleger in Bezug auf Ausrichtung und Materialdopplung untersucht. Die Kennwerte sind Anhaltspunkte für die spätere Neuauslegung des FVK-KUM. Ein weiterer Bestandteil der Grundlagenentwicklung betrifft das Drapierverhalten der Einleger. Die Drapierung einer komplexen Geometrie wird getestet, um zu prüfen, ob eine Übertragbarkeit von der 1D-Musterplatte auf die 3D-Bauteilgeometrie möglich ist. Die Gitterstrukturen werden an einem lasergesinterten Modell der Versagenszone geformt und die entstehende Verschiebung der Fasern festgehalten. Dieser Schritt ist Anhaltspunkt für die minimalen Drapierradien innerhalb der späteren FVK-Geometrie. Der Zeitpunkt der Faltenbildung innerhalb der Gittergewebe wird über einen Scherrahmenversuch und den Drapetest festgehalten und dient der Ermittlung des kritischen Scherwinkels sowie der Verschiebung der Fasern während des Schervorgangs.

Der Pfad der Bauteilentwicklung bezieht sich auf die Integration der Gittergewebe in die 3D-Kontur des KUM während des Herstellprozesses. Um seriennahe Bauteile zu erhalten, ist der Bau eines Prototypenwerkzeugs mit angepasster Kontur vorgesehen. Die Basis hierzu bilden die Erkenntnisse aus dem Grundlagenentwicklungspfad. Die Bauteilbemusterung ermöglicht die Bewertung von Handling und der Verarbeitung der Einleger. Zusätzlich deckt sie Optimierungsbedarfe für einen späteren automatisierten Serienprozess auf. Die FVK-KUM werden bauteilspezifischen Freigabeproofungen unterzogen und in ihrer Performance mit dem aktuellen Serienbauteil abgeglichen. Abschließend erfolgt ein Schlittencrashversuch, in dem die faserverstärkten KUM einem Frontalaufprall ausgesetzt werden. Die verbauten Sensoren messen parallel die Beschleunigung und geben Anhaltspunkte für das Verhalten des FVK-KUM unter dynamischer Beanspruchung. Mit diesem Versuch kann eine Bewertung der Faserverbundstruktur im Kunststoffmontageträger hinsichtlich Crashtaughlichkeit erfolgen und eine Empfehlung für eine mögliche Integration in die Serienfertigung sowie die Übertragung auf andere potenzielle Bauteile ausgesprochen werden. Der Aufbau der systematischen Entwicklungsstruktur als Kreislauf ermöglicht eine stete Optimierung im Fall von bspw. gesetzlichen Anforderungsänderungen.

Erarbeitung des Substitutionspotentials

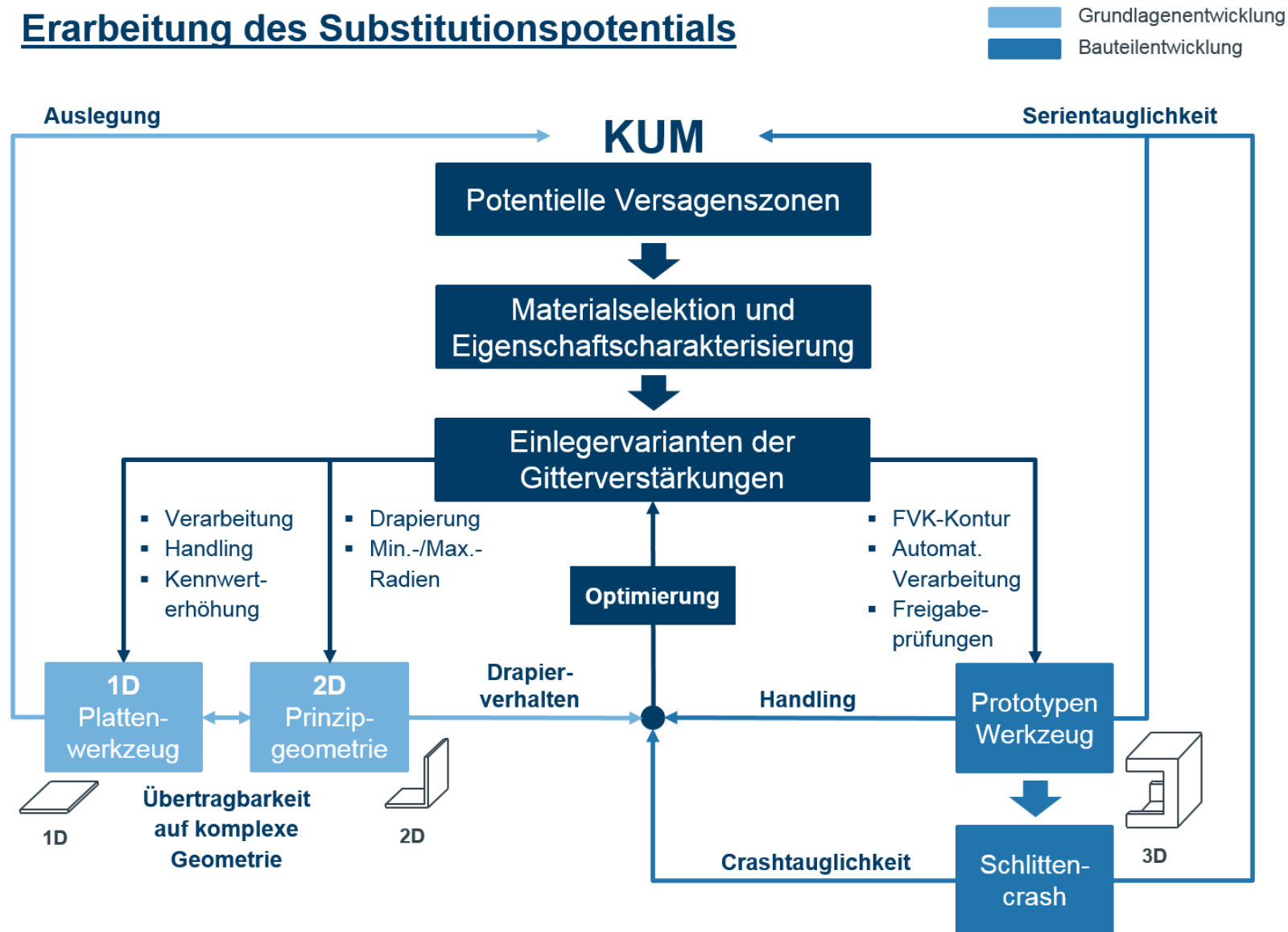


Abb. 4: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Rechtliche Leichtbauvoraussetzungen

Im Folgenden werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen als Triebfeder für den Leichtbau diskutiert. Der Fokus liegt auf den europäischen Richtlinien bezüglich der CO₂-Emission. Eine Vereinbarung des ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) über die Reduzierung von Kohlendioxid bei Neufahrzeugen, war bereits ab Mitte der 90er Jahre gültig. Diese führte bis zum Jahr 2007, bezogen auf den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß aller EU-Staaten, jedoch nur zu einer Reduzierung um 1,2 %. Infolgedessen trat 2007/2008 eine EU-Regelung in Kraft, die eine sukzessive Minderung des CO₂-Ausstoßes auf 130 g CO₂/km bis 2015 für alle produzierten Neuwagen festlegte. Das Ziel für 2021 wurde in gleichem Atemzug auf 95 g CO₂/km festgelegt, was einem durchschnittlichen Verbrauch von etwa 4,0 L/100 km für einen Ottomotor entspricht [2] [5].

Auf Grund der unterschiedlichen Strukturen im Portfolio der Automobilhersteller, hat die EU einen zusätzlichen, gewichtsbasierten Ausgleichsfaktor eingeführt. Dies hat zur Folge, dass ein Hersteller mit durchschnittlich erhöhtem Flottengewicht, einen höheren CO₂-Grenzwert erhält. Der Verstoß gegen diese Richtlinien wird ab 2018 mit einer Strafzahlung von 95 € pro Gramm und produziertem Fahrzeug sanktioniert. Abb. 5 zeigt das durchschnittliche Gewicht der Fahrzeugflotten verschiedener Hersteller mit der zugehörigen CO₂-Emission [5].

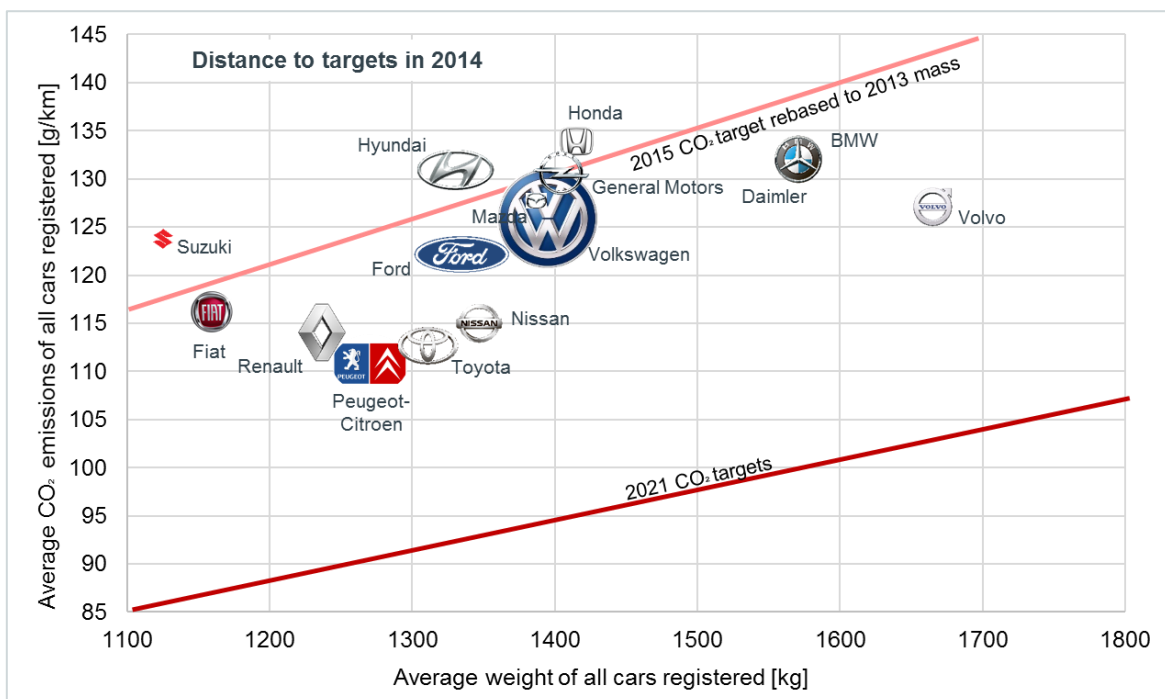


Abb. 5: Gewichtsbasierter EU-Richtwert mit entsprechenden Flottenwerten der Hersteller – Stand 2014 [12]

In obenstehender Abbildung ist zu sehen, dass nicht alle Hersteller die vorgeschriebene Richtlinie der EU für 2015 unterschritten haben. Die Unternehmen VW und Opel sind zielführend ausgerichtet, während Honda oder Hyundai sich oberhalb der vorgegebenen Richtlinie ansiedeln. Diese Unterschiede sind auf abweichende Einführungszeiten von Verbrauchstechnologien zurückzuführen. Ein weiterer Grund sind Modellwechsel und neue Fahrzeugarchitekturen, die zu langwierigem Typenwechsel führen. Diese geschehen meist in einem Zeitrahmen von 5-7 Jahren. In Fachkreisen wird die Meinung vertreten, dass bei den Premiumherstellern der gesetzte Ziel-Emissionswert nur mit einer kompletten Neuauslegung der Fahrzeugarchitektur und des Antriebsportfolios zu erreichen ist [5].

2.2 Forschungsschwerpunkte und Benchmark

Der Entwicklungsfokus in Bezug auf Faserverbundkunststoffe divergiert zwischen Industrie und der Forschung an Universitäten. Während sich die wissenschaftliche Arbeit an Instituten oftmals mit Grundlagenforschung befasst, sind die Untersuchungen in der Industrie eher anwendungsorientiert. Um einen umfassenden Überblick zu erhalten, werden im Folgenden sowohl Forschungsschwerpunkte der Universitäten bezüglich Eigenschaften, Drapierung und Verarbeitung von Textilien, als auch anwendungsbezogene Veröffentlichungen (Benchmark) der OEMs und Tier-Ones aufgezeigt.

Forschungsschwerpunkte

Eigenschaften und Drapierung von Textilien

In [13] stellen DAI ET AL. eine vergleichende Studie zwischen duroplastischen Faserverbundkunststoffen mit Epoxidharz und sechs verschiedenen 3D-Geweben mit unterschiedlichen Webmustern auf. Diese 3D-Gewebe bestehen aus mehreren orthogonal zueinander ausgerichteten Schuss- und Kettlagen, die in Z-Richtung durch einen Binderfaden miteinander verwebt sind. Der Fokus bei der Auswertung liegt auf den Zug-, Biege- und Druckeigenschaften in Kettrichtung. Durch visuelle Betrachtung und DIC - strain maps (Digital Image Correlation) kann nachgewiesen werden, dass die Kreuzungs-/Bindungspunkte im Webaufbau bei allen Varianten als Schwachstellen im Material anzusehen sind. Trotz einer idealisierten Auslegung sind Krümmungen der Rovings, auch Ondulationspunkte genannt, im Webprozess entstanden, die die Zugeigenschaften der lasttragenden Fasern negativ beeinträchtigen. Mittels optischen Messsystems sind Initialrisse an den Kreuzungspunkten des Textils nachweisbar.

COX ET AL. raten in [14] zur Steigerung der Druckeigenschaften Lastfäden in geometrischen Wiederholungen in ein Gewebe einzubauen, anstatt den Faservolumenanteil zu erhöhen. Ein

erhöhter Faservolumenanteil führt nachweislich zu sprödem Versagen und einer geringen Bruchdehnung, wobei das Versagen an den Kreuzungspunkten der lasttragenden Fasern einsetzt (vgl. [13]). Weiterhin kann sowohl die Schlagzähigkeit als auch die Delaminationskraft über das Einbringen von Lastfäden in Dickenrichtung gesteigert werden [15] [16].

Um konturnahe Faserverbunde herzustellen haben WANG ET AL. in [17] einen Vergleich zwischen 3D-gewebtem Textil und einem umgeformten 1D-Textil über experimentelle und numerische Analyse aufgestellt. Hintergrund ist die Entwicklung eines 3D-Webprozesses, um den zeitaufwändigen Schritt des Preformen zu umgehen und einen gleichmäßigen Faservolumengehalt in allen Bauteilbereichen zu schaffen. Bei der Abformung eines Würfels in einem 1D-Textil aus C-Fasern zeigt sich, dass mit einer hohen Kraft am Niederhalter Falten in den Ecken vermindert werden. Es entstehen dadurch jedoch relativ starke Verschiebungen innerhalb des Textils. Im Vergleich zu dem recht aufwendigen 3D-Webprozess ist festzuhalten, dass die Umformung eines 1D-Textils schneller und wirtschaftlicher ist [17]. BOISSE ET AL. stellen hierzu in [18] fest, dass die Bildung von Oberflächenfehlern (Beulen, Falten, Verzug, Faserbruch) eine grundsätzliche Herausforderung bei der Drapierung darstellen und von der Dehnung, der Steifigkeit und den Grenzflächeneigenschaften eines Textils abhängen.

In [19] beurteilt ZANJANI das Versagen rechteckig gewebter Textilie mit unterschiedlichen Faserausrichtungen und Seitenverhältnissen. Über die Verschiebungen innerhalb der Textilie während des Drapiervorgangs entwickelt er das weg-/deformationsabhängige Versagenskriterium FLC (Forming Limit Curve). Die FLC setzt sich aus den Tangenten unterschiedlicher Verformungsstufen zusammen, an denen maximale Dehnung ohne Versagen auftritt. Durch diese Darstellung gelingt eine Vorhersage für ε_{\max} bei unterschiedlichen Textilgeometrien und Verformungsstärken.

Charakterisierung der Faserbündel-Matrix Haftung

In wissenschaftlichen Arbeiten von ZHAMU ET AL. [20] wird im experimentellen Maßstab ein Faserbündel Pull-Out Test entwickelt, um die Haftung von Faserbeschichtungen in einer Epoxidharzmatrix zu bewerten. Die Faserbündel werden dazu mit unterschiedlichen Haftvermittlern kombiniert und anschließend in einer Form mit einer Epoxidharzmatrix eingebettet. Durch einen Zugversuch wird anschließend die Auszugskraft der Faserbündel aus der Matrix bei einer Zuggeschwindigkeit von 1 mm/min gemessen. Darauf aufbauende Untersuchungen von KROLL [7] zeigen einen weiteren Ansatz zur Präparation von Faserbündelauszugproben. Diese sollen dabei in erster Linie der Bewertung der Mikroimprägnierung von trockenem Fasermaterial durch die Ermittlung von Auszugskräften dienen.

Verarbeitung und Imprägnierung von FVK im Spritzgießprozess

In Voruntersuchungen zur Konsolidierung unterschiedlicher kommerziell verfügbarer thermoplastischer Halbzeuge stellt J. KUNZMANN [9] fest, dass Hybrid-Rovings (Polymer- und Verstärkungsfasern) bei der Verarbeitung stärker zu Lufteinschlüssen neigen, als bereits vorkonsolidierte Halbzeuge. Er empfiehlt demzufolge, dass trockene Textilien in gesonderten Imprägniervorgängen, bspw. über Pulverimprägnierung, vorbehandelt werden sollen. J. TRÖLTZSCH zeigt indes in [21] die Möglichkeit auf, trockene Textilien in einem abgewandelten Spritzgussprozess zu imprägnieren. Hierbei muss ein Binder- oder Fixierungsmaterial auf das Textil aufgebracht werden, damit dieses den Drücken während des Einspritzzyklus standhält und ein unkontrolliertes Verschieben der Textilien verhindert wird. Weiterhin sind ein Handlingsystem zur Positionierung des Textils sowie gesonderte Spritzparameter, ähnlich einem Prägehub notwendig.

Im Zuge eines geförderten Forschungsvorhabens [10] zeigen HUFNAGL ET AL. die Möglichkeit, gewirkte Gelege mit einer groben Struktur im Spritzgießprozess zu verarbeiten. Das vielversprechendste Gelege besteht aus einem Hybridroving aus Glas- und Polypropylenfasern. Für eine erfolgreiche Verarbeitung ist festzuhalten, dass eine vorgeschaltete Konsolidierung sowie ein Prozess mit mittleren Spritzdrücken für ein intaktes formstabiles Gelege notwendig sind. Ebenfalls stellen die Untersuchungen heraus, dass eine genaue Positionierung über Positionierhilfen zu gewährleisten ist und die Faser-Matrix Haftung gezielt optimiert werden muss [10].

Ein weiteres Forschungsvorhaben [22] befasst sich mit der zielgerichteten Einbindung von Hybridgarnen bzw. Schmelzklebefäden zur Schaffung anforderungsgerechter Fixierzonen in einem Preform. Als textile Verarbeitungsgrundlage werden Gewebe und biaxiale Mehrlagengestricke ausgewählt. Die Verarbeitung soll später sowohl im RTM-Prozess, als auch im Spritzgießprozess möglich sein. Hierzu werden im Anschluss an die simulationsbasierte Auslegung die Fixierungsfäden beim Flächenbildungsprozess in das Textil integriert. CHERIF zeigt hier, dass ein Einbinden von Fixierungsfäden sowie die ganzheitliche oder teilweise Fixierung mit Hilfe eines IR-Strahlerfeldes gelingt und sich entsprechend der Fixierung unterschiedliche Drapierbarkeiten innerhalb eines Textils abbilden lassen [22].

Bei einer weiteren Verstärkungsvariante beziehen sich HÄNTZSCHE ET AL. in [23] auf eine Gitterverstärkung für den Bausektor. Diese wird nicht im Spritzgussprozess verarbeitet, sondern mit einem Betongemisch umgossen. Das vernähte Biaxial-Gelege besteht aus Kohlenstofffasern umgeben von einer SBR-Dispersion und besitzt Gitteröffnungen von 10,7x14,3 mm sowie ein Flächengewicht von 490 g/m². Das Gelege ist im Bausegment bereits implementiert und ersetzt die klassische Betonstahllarmierung.

Benchmark

Leichtbaukonzepte des Konzerns

Als zukunftsorientiertes Leichtbaufahrzeug stellt VW 2011 den *XL1* als Nachfolger des ‚1-Liter-Autos‘ vor. Der *XL1* wiegt 795 kg, wobei 21 % des Gesamtgewichts auf eingesetzte Carbonbauteile entfallen. Neben dem Fahrer-Monocoque bestehen alle Karosserieaußenteile und Funktionselemente aus CFK (Abb. 6).



Abb. 6: CFK-Komponenten des VW XL1 [24]

Weiterhin sind Naturfasern, Leichtmetalle und Kunststoffe verbaut, wie beispielsweise Polycarbonat für die Seitenscheiben des *XL1* [4]. Mit Blick auf die Serienproduktion findet sich Leichtbau mit Naturfaserverstärkung beim VW *Tiguan* in der Mittelkonsole wieder. Weitere Naturfaserprodukte befinden sich in Tür- und Kofferraumverkleidungen und in der Heckklappe [25]. Die Volkswagen-Konzernforschung verfolgt indes die Entwicklung von Faserverbundbauteilen, hergestellt durch das T-RTM Verfahren. Ein Faserhalbzeug wird mit einem reaktiven Caprolactam-System getränkt und anschließend in einem isotherm temperierten Werkzeug für 2-3 Minuten polymerisiert. Die Endkontur wird nach der Entnahme des Bauteils über Wasserstrahlschneiden angepasst. Das aktuelle Bauteil soll als Verstärkung der B-Säule für den nordamerikanischen Markt dienen [26].

Audi setzt bei einem Großteil seiner Bauteile auf kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Hier können bspw. die Domstreben aus pulverbeschichtetem Magnesium, Aluminium oder CFK hergestellt werden. Ein weiteres Zielbauteil ist ein alternatives Dach aus CFK als Substitution zu dem in Serie verbauten Aluminium. Im aktuellen A8 setzt *Audi* im Bereich des Vorderwagens auf ein Hybridfrontend, bei dem der untere Querträgerbereich aus 1 mm starkem Organoblech besteht. Das leichtere Frontend zeigt dennoch verbesserte Eigenschaften und kann der Belastung durch den Lower-Leg-Schutz und den Stoßfänger standhalten. Weiterhin fokussiert sich *Audi* auf

den erweiterten Einsatz naturfaserverstärkter Kunststoffe, vornehmlich aus Leinen und Basalt. Entgegen dem Carbon-Image zeigt *Audi* damit eine kundenorientierte, nachhaltige Seite [27]. In Zusammenarbeit mit *Bond Laminates*, *Engel* und *ZF-Damme* (heute *Boge*), hat *Porsche* einen ersten Einsatz von Organoblechen in Serie gewagt. Der *Porsche 918 Spyder* verfügt als sicherheitsrelevantes Bauteil über ein Hybridbremspedal, das ab Mitte 2013 in Serie produziert wird. Das Hybridpedal besteht aus einem Verbund von GF-Organoblech und Polyamid und bringt mit 355 g eine Gewichtsreduktion von etwa 30 % mit sich. Das Gewebe im Sichtbereich trägt zu einer progressiven Optik des Pedals bei und unterstreicht den innovativen Aufbau [28].

Leichtbaukonzepte des Wettbewerbs

Der Einsatz von Carbonfasern wird bei *BMW* durch eine Kooperation mit der Firma *SGL Carbon* realisiert, die die Fasern eigens für das bayerische Unternehmen synthetisieren. Die einzelnen Karosseriekomponenten des Elektro-Stadtewagens *i3* werden bspw. aus CFK hergestellt und abschließend in einem finalen Montageschritt zum Rohbau verklebt. Als Außenhautbeplankung der Karosse wird je nach erforderlichem E-Modul ein PP/EPDM oder ein PC+SAN Gemisch verwendet. Bei dem Dach hingegen, greift *BMW* im Sinne der Nachhaltigkeit auf rezyklierte CFK-Gelege zurück. In Zusammenarbeit mit *BASF* stellt das Unternehmen eine 1,4 mm dicke, selbsttragende Sitzschale aus einem Polyurethan in Verbindung mit Carbon her [29]. Weiterer funktionaler Leichtbau findet sich in der Unterbodenverkleidung des *BMW M3* wieder. Fasermatten aus Glas- und Polymerfasern werden im Niederdruck-Pressverfahren geformt und konsolidiert. Diese schützen die Unterseite des Autos vor Beschädigungen durch Steinschlag. Andere, teilweise auf Naturfasern basierte Formteile, sind in den Heckklappen und Türmodulen der *BMW 3er-* und *5er-Reihen* zu finden [25] [30]. Um das Gewicht der Motorlager zu reduzieren, werden bei *BMW* besagte Lager und weitere Strukturbauteile aus glasfaserverstärktem Polyamid hergestellt. Neben der Gewichtseinsparung von bis zu 50 %, ist der Einsatz von recyceltem Material ein entscheidender Vorteil der Faserverbunde [31].

Eine Innovation der *Daimler AG* betrifft den Modulquerträger. Hier wird mit der IHU-Polymerhybridtechnik ein Aluminium Rohr umgeformt und mit einem PA6-GF-Compound umspritzt. Das Hybridbauteil weist gezielte Verstärkungen in lastkritischen Bereichen auf und lässt eine Reduzierung der Wandstärke des Aluminiums zu. Das Verbundbauteil ist ein großer Schritt in Richtung Hybridlösung für tragende Bauteile [31]. Das aktuelle Leichtbau-Fahrzeug der *Daimler AG* ist der *SLS AMG electric drive*. Mit einem Batterie-Carbon-Monocoque genügt der *SLS* den höchsten Craschanforderungen im Test. Weitere Bauteile aus Carbon sind beispielsweise die Kardanwelle und ein Sandwichbauteil zur Aufnahme des Windschotts [32].

Fa. Engel bietet in ihrem Maschinenportfolio das Verfahren der In-situ Polymerisation von Polyamid an. Mit Hilfe eines Reaktivaggregats besteht die Möglichkeit, trockene vorgeformte Textilien im Spritzgusswerkzeug mit Monomer zu tränken und den Kunststoff innerhalb der Kavität zu polymerisieren. Die weiterentwickelte Anlagentechnik verspricht kürzere Verweilzeiten und eine dementsprechend erhöhte Produktivität [33].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anwendung von Faserverbundkunststoffen in der Automobilindustrie nur in bestimmten, meist hochpreisigen Segmenten vertreten ist. Neben dem Einsatz von Organoblechen, gibt es nur wenige Alternativen für eine Verarbeitung von FVK im Spritzgussverfahren. Die beschriebene In-situ Polymerisation von Polyamid (*Fa. Engel*) weist zwar ein gutes Tränkungsverhalten auf, kann aber mit den SG-Zykluszeiten der Serie nicht konkurrieren. Weiterhin liegen die mechanischen Kennwerte des In-situ Polyamids deutlich unter denen herkömmlicher Polyamide. Die Forschung an Universitäten beläuft sich zumeist auf duromere Matrixmaterialien, die niedrige Viskositäten und somit gutes Tränkungsverhalten aufweisen. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, thermoplastisches Matrixmaterial mit zu verweben bzw. über Pulver und Folien auf das Textil aufzubringen. Hier sind jedoch vorgeschaltete Konsolidierungsprozesse und ein damit verbundener Mehraufwand notwendig. Das direkte Imprägnieren von Textilien im SG-Prozess ist nur über einen zusätzlichen Vibrationsvorgang des Werkzeugs und eine entsprechend längere Zykluszeit möglich.

Beurteilung der aktuellen Forschungsschwerpunkte und des Benchmarks

Anhand der aktuellen Veröffentlichungen und der Forschungsschwerpunkte an Universitäten und Instituten ist zu erkennen, dass die Verarbeitung von gitterartigen Textilien im Spritzgussprozess nicht ausreichend erforscht und untersucht ist. Die angeführte Literatur beschäftigt sich in Bezug auf Eigenschaften und Drapierung vornehmlich mit dichtgewebten mehrlagigen Textilien [13] und geometrischen Wiederholungen im Webprozess [14]. Hierdurch können Eigenschaften wie Schlagzähigkeit, Druckfestigkeit und Delaminationskraft erhöht werden. Diese Betrachtungen wurden jedoch auf Basis duroplastischer Faserverbunde durchgeführt, sodass eine Beurteilung von thermoplastischen Faserverbunden weiterhin aussteht. In Bezug auf die Drapierbarkeit ist festzuhalten, dass die Faserausrichtung und der Fasergehalt im Textil [18] [19] in Abhängigkeit zu der Drapierbarkeit stehen. Demnach empfiehlt sich für eine einfache Drapierung auf Textilien mit einem geringen Fasergehalt und einer niedrigen Anzahl an Bindungspunkten zurückzugreifen, was durch die Verwendung von Gitterstrukturen aufgegriffen wird. Die Untersuchungen eines 3D-Webprozess für Preforms in [17] stellen sich als unwirtschaftlich heraus, sodass sich

für erhöhte Stückzahlen 1D-Textile mit flachen und einfachen Drapiergeometrien eignen. Diese Rahmenbedingungen werden bei der späteren Bauteilauslegung mitbetrachtet.

Die Verarbeitung von Textilien im Spritzgussprozess bezieht sich in der Literatur [9] [10] [22] größtenteils auf die Verwendung von Hybrid-Rovings. Hierbei zeigen sich Lufteinschlüsse und fehlende Konsolidierung, die zu Schwachstellen im Verbund führen. Die Verarbeitung von trockenen Textilien setzt ebenfalls eine Imprägnierung und Konsolidierung voraus, die vorgezogen oder direkt im Werkzeug [21] stattfindet. Der Imprägnierungs- und Konsolidierungsprozess schlägt bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Verarbeitungsprozesses negativ zu Buche, weshalb die Verwendung von Gitterstrukturen als mögliche Verstärkungsalternative ein neues Untersuchungsfeld eröffnet. In Bezug auf den Bausektor [23] bestehen bereits erfolgreiche Untersuchungen an Gitterverstärkungen, die in Form eines Biaxial-Geleges bereits kommerziell als Alternative zum Stahlbeton verfügbar sind.

Der Benchmark an serienmäßig hergestellten Leichtbauteilen zeigt im Bereich des Faserverbunds durchgehend dichtgewebte flächige Textilien (meist aus Carbon), die im RTM-Prozess oder als vorkonsolidiertes Organoblech im Spritzgussprozess verarbeitet werden. Eine Verarbeitung von gitterartigen Textilien wird aktuell nicht in Serie eingesetzt.

Die Forschungsschwerpunkte sowie der Benchmark zeigen ausreichende Forschungslücken im Bereich der Charakterisierung und Verarbeitung von textilen Gittern auf. Zu untersuchen sind außerdem die Grenzflächeninteraktion, die Drapierfähigkeit sowie die Möglichkeit zur Automatisierung.

2.3 Definition Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe oder Faser-Kunststoff-Verbunde sind Werkstoffe, bei denen unterschiedliche Komponenten bzw. Materialien miteinander kombiniert werden (vgl. Abb. 7). Unter Ausnutzung der spezifischen Materialeigenschaften werden im Verbund mechanische Kennwerte erreicht, die oberhalb derer der jeweiligen Einzelkomponentenwerte liegen. Die hochfesten Fasern der FVK dienen der Aufnahme von Lasten und erhöhen die Steifigkeit und Festigkeit des Verbundes. Eine elastische Matrix dient der Fixierung und dem Schutz der Fasern und überträgt äußere Kräfte in die Verstärkung. Je nach Zusammensetzung und Anordnung der Faserorientierung können anisotrope Werkstoffeigenschaften erzielt werden, welche den jeweiligen Belastungsfällen angepasst werden können. Besonders bei Spritzgussanwendungen stellt die strömungsbedingte Faseranordnung eine Orts- und Richtungsabhängigkeit der Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte dar, welche bei der Auslegung von Bauteilen berücksichtigt werden müssen [34] [35].

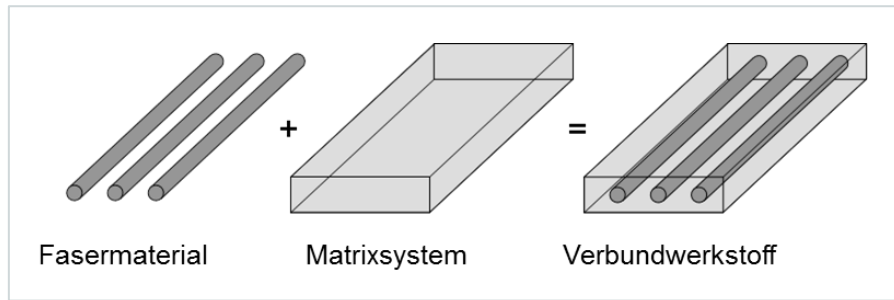


Abb. 7: Aufbau von Faserverbundkunststoffen, modifiziert [36]

2.4 Matrixsysteme für Faserverbunde

Für einen Faserverbundkunststoff können unterschiedliche Polymerwerkstoffe als Matrixwerkstoff verwendet werden. Die Hauptaufgaben der Matrix umfassen unter anderem das Fixieren und Schützen der Fasern vor Umgebungseinflüssen, die Kräfteeinleitung in die Verstärkungselemente sowie den Schutz vor Ausknicken bei Druckbelastungen in Faserlängsrichtung. Darüber hinaus bestimmt die Matrix einen Großteil der Haupteigenschaften des Verbundwerkstoffs, wie beispielsweise die Dichte, das Schlagzähverhalten, die Kriechneigung oder auch die Temperatureinsatzgrenzen. Bei Matrixsystemen für FVK-Anwendungen werden Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere verwendet [34]. Thermoplaste können aus verzweigten oder linearen Makromolekülen aufgebaut sein, die anders als Duroplaste und Elastomere, nicht miteinander vernetzt sind. Die beweglichen Molekülketten werden demnach lediglich durch Nebenvalenzbindungen bis zu einem gewissen Belastungsgrad in Position gehalten. Die Festigkeit eines Thermoplasts basiert also nicht auf der kovalenten Bindung des Kohlenstoffs in der Hauptkette, sondern entsteht durch die räumliche Anordnung der Ketten zueinander. Diese Ordnung kann amorph oder teilkristallin Natur sein, wie in Abb. 8 veranschaulicht. Je geordneter die Struktur ist, desto besser sind die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes [37] [38].

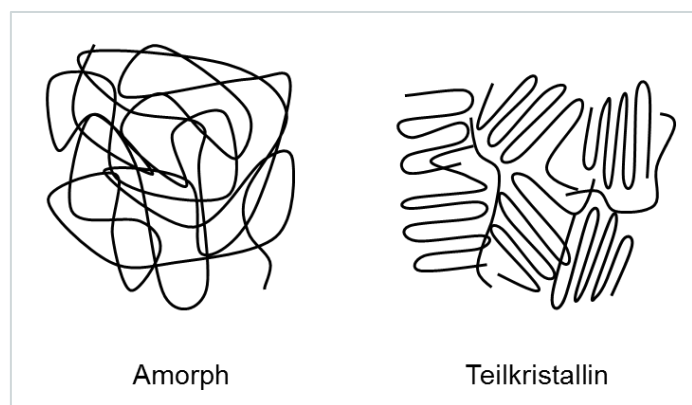


Abb. 8: Schematische Darstellung der Polymerkettenstruktur; amorph (links) und teilkristallin (rechts)

In folgendem Abschnitt wird im Besonderen auf Polypropylen (PP) eingegangen. Das Polypropylen gehört zu den häufig eingesetzten Kunststoffen im In- und Exterieur und ist Matrixwerkstoff für den Kunststoffmontageträger des aktuellen *Tiguan*. Es wird im weiteren Verlauf näher betrachtet.

Polypropylen

Die Herstellung von Polypropylen erfolgt durch die Polymerisation von Propylen-Monomeren. Der chemische Aufbau von Polypropylen ist in Abb. 9 dargestellt. Die Methylgruppe (CH₃-Gruppe) ordnet sich je nach Herstellungsverfahren bei der Polymerisation räumlich unterschiedlich an. Dabei wird zwischen isotaktischen, syndiotaktischen und ataktischen PP unterschieden, welche sich durch ihre mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften voneinander abgrenzen [39].

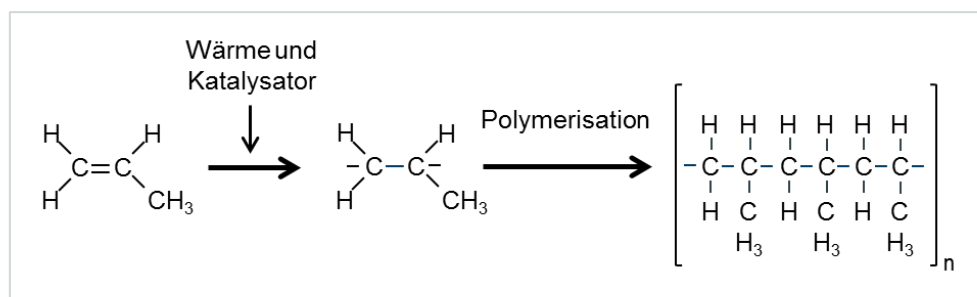


Abb. 9: Polymerisation von Polypropylen (isotaktisch)

Im Vergleich zu Werkstoffen wie PA, ABS oder PBT fallen die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Schlagzähigkeit von Polypropylen geringer aus. Weiterhin führt der unpolare und hydrophobe Charakter zu einer hohen Benetzungsträgheit, welche sich negativ auf die Faser-Matrix Anbindung auswirkt. Nachteilig ist ebenfalls die hohe Schmelzviskosität im Verhältnis zu bspw. einem Epoxidharz zu nennen, die das Imprägnier- und Benetzungsverhalten von Fasern erschwert. Trotz dieser nachteiligen Eigenschaften ist der Einsatz von Polypropylen aufgrund seiner guten Verarbeitungseigenschaften im Spritzgussprozess und der niedrigen Materialkosten für eine Vielzahl von Anwendungsfällen zu rechtfertigen [39] [40].

Aufgrund der nur gering verzweigten Seitengruppe des Polymers und der dadurch begünstigten Kristallisation ist isotaktisches PP den teilkristallinen Thermoplasten zuzuordnen. Das Formänderungsverhalten von teilkristallinen Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abb. 10 dargestellt. Bei der Abkühlung aus der Schmelze ordnen sich die Moleküle in Bereichen mit geordneter, kristalliner Struktur an. Zwischen den kristallinen Bereichen bilden sich amorphe Strukturen aus.

Bei Temperaturen unterhalb des Glasübergangs T_G sind sowohl die kristallinen als auch die amorphen Bereiche des Werkstoffes erstarrt, sodass sich harte und spröde Werkstoffeigenschaften einstellen. Zwischen dem Glasübergang und dem Kristallitschmelzbereich (KB) nimmt mit steigender Temperatur die Beweglichkeit der Molekülketten in der amorphen Phase zu. Mit den zähelastisch bis harten mechanischen Eigenschaften liegt hier der Gebrauchsbereich des Werkstoffes. Beim Überschreiten des Kristallitschmelzbereich erweichen ebenfalls die kristallinen Bereiche des Werkstoffes. Die Festigkeit des Kunststoffes fällt dadurch steil ab, während die Dehnbarkeit ihr Maximum erreicht. Bei weiterer Erwärmung über den Fließbereich hinaus verringert sich die Viskosität zunehmend, bis der Zersetzungspunkt des Kunststoffes erreicht ist.

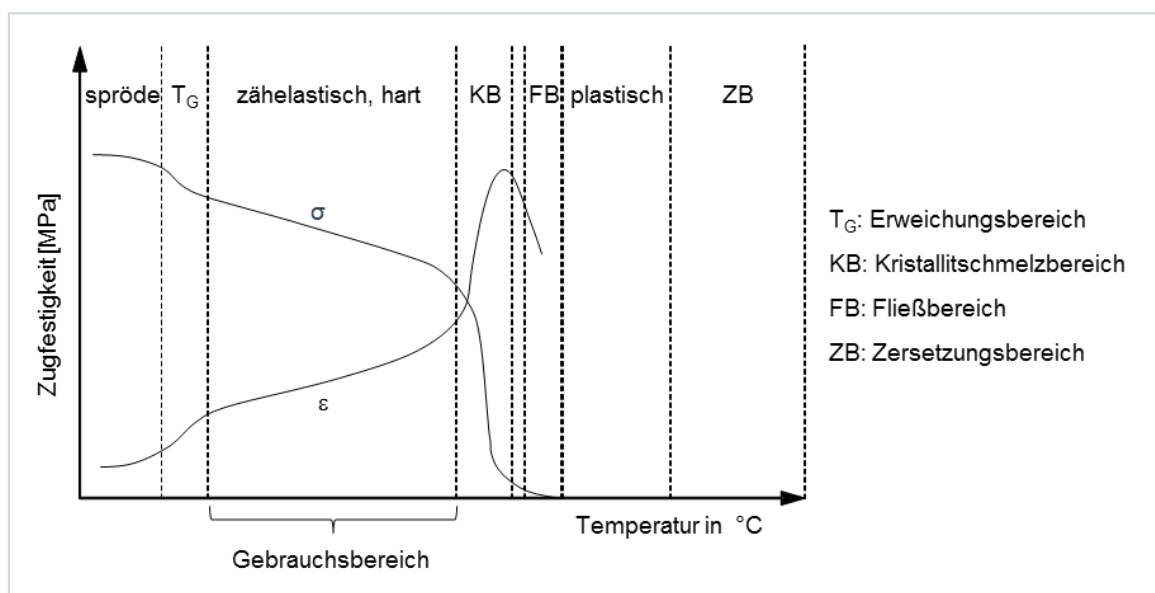


Abb. 10: Zugfestigkeit σ und Bruchdehnung ϵ eines teilkristallinen Thermoplasts über der Temperatur T [41]

Das große Einsatzspektrum von PP liegt an der Vielzahl der möglichen Modifikationen, die es ermöglichen, den Kunststoff auf seinen späteren Anwendungszweck anzupassen. Neben Additiven, wie Füllstoffen, Weichmachern und Stabilisatoren, ist auch eine Mischung von Polymeren (Copolymerisation) möglich. Werden bspw. Polyethylen (PE) und PP gekoppelt, liegt ein schlagzähes Verhalten auch bei niedrigen Temperaturen vor. Ein reines PP-Homopolymer hingegen versprödet, was für den Einsatz von Bauteilen, die einer Schlagbelastung im Winter ausgesetzt sind, von Nachteil ist. Dennoch geht eine derartige Modifikation auch immer mit dem Verlust von anderen Werkstoffkennwerten, wie der Steifigkeit oder Zugfestigkeit einher. Folgende Grafik (Abb. 11) veranschaulicht, wie unterschiedliche Zusatzstoffe und Füllgrade die Schlagzähigkeit eines Polypropylens (*Hostacom*, *Fa. Lyondell Basell*) über den Temperaturbereich von -40°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ verändern [39] [40] [42]. Der Buchstabe und die Zahl hinter dem

Markennamen stehen jeweils für die Art (Glasfaser, Mineral, etc.) und den prozentualen Anteil des Füllstoffes. Das dreistellige Kürzel weist auf das verwendete Basispolymer in Kombination mit unterschiedlichen Additiven hin, die bspw. zu einer erhöhten Wärmefombeständigkeit oder einer sehr hohen Steifigkeit führen.

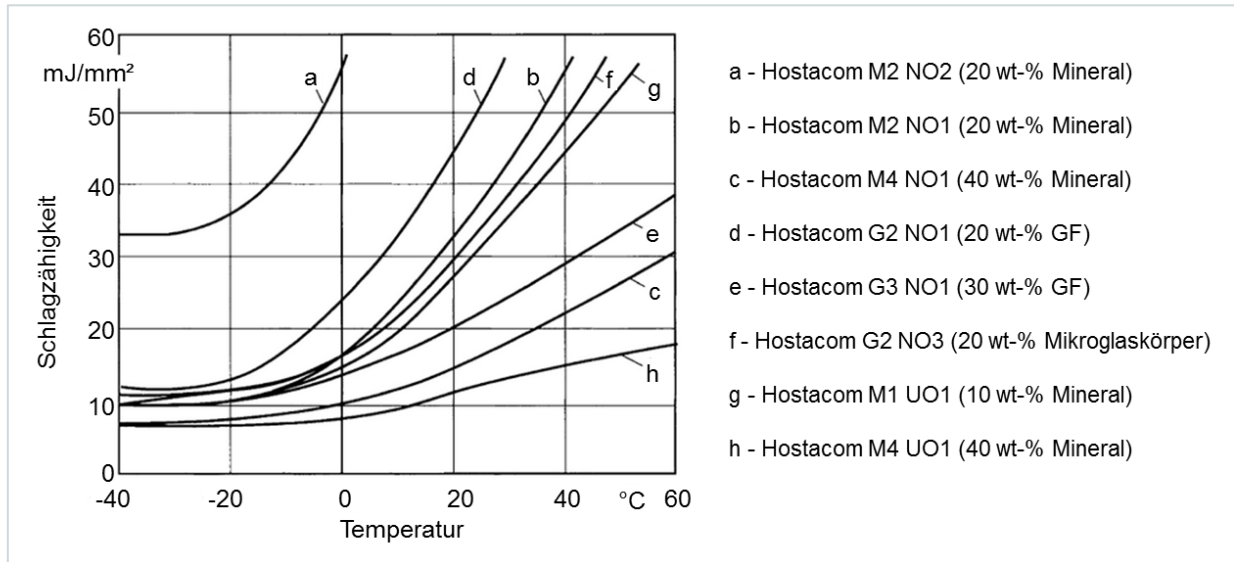


Abb. 11: Einfluss der Temperatur auf die Schlagzähigkeit verschiedener Hostacom-Typen (nach ISO 179), modifiziert [42]

Aus Abb. 11 geht hervor, dass mit steigendem Füllstoffgehalt die Schlagzähigkeit bei allen Kunststoffen über den gesamten Temperaturbereich sinkt. Die Kurvenverläufe von „c“ und „h“ verdeutlichen, dass nicht allein der Füllgrad über das Schlagzähigkeitsverhalten entscheidet. Die faserverstärkte Type in Kurve „e“ kann im Bereich der Glasübergangstemperatur und darunter sogar mit der 10 wt.% mineralgefüllten Type konkurrieren. Da PP unpolar ist, besitzt es im Vergleich zu anderen technischen Kunststoffen wie Polyamid (Wasseraufnahme 13 %) eine sehr geringe Wasseraufnahme von unter 0,2 %. Dies hat zur Folge, dass sowohl die Dimensionsstabilität als auch die mechanischen Eigenschaften durch Feuchtigkeit nicht beeinträchtigt werden und die Beständigkeit gegen Säuren, Öle und Treibstoffe steigt [39] [40]. Nachfolgende Tab. 1 gibt eine Übersicht über weitere physikalische Eigenschaften unterschiedlicher PP-Typen mit Zusatzstoffen. Die für den späteren Anwendungsfall bedeutende Schlagzähigkeit wird zusätzlich aufgeführt und setzt sich aus den durchschnittlichen Kennwerten unterschiedlicher vergleichbarer Materialien (Basispolymer PP *Hostacom*) zusammen.

Tab. 1: Eigenschaften unterschiedlicher PP-Sorten mit verschiedenen Zusatzstoffen [39] [42] [43]

Eigenschaft	Einheit	PP-H Homopoly.	PP-TD20 Talkum	PP-GF30 Glasfaser	PP-GF30 chem. gekoppelt
Dichte	g/cm ³	0,90-0,915	1,21-1,24	1,12-1,14	1,12-1,14
Zug-E-Modul	MPa	1300-1800	2200-2800	5200-6000	5500-6000
Streckspannung	MPa	25-40	32-38	-	-
Streckdehnung	%	8-18	5-7	-	-
Bruchspannung	MPa	-	28-30	40-45	70-80
Bruchdehnung	%	-	15-20	3-5	3-5
Schlagzähigkeit (ungekerbt)	kJ/m ²	18-45	40-45	45-50	45-55
Schmelzetemperatur	°C	162-168	162-168	162-168	162-168
Aufnahme Wasser bis Sättigung bei RT	%	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2

2.5 Verstärkungsfasern

Fasern, die eine verstärkende Wirkung erzielen, können nach SCHÜRMANN [34] wie Abb. 12 zeigt unterteilt werden. Dabei wird in vier Hauptkategorien – den Naturfasern, den organischen und anorganischen Fasern und den Metallfasern – unterschieden.

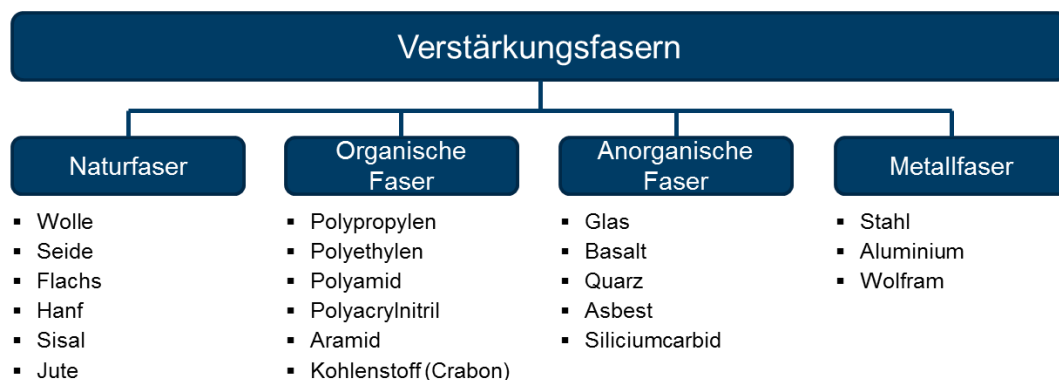


Abb. 12: Unterteilung von Verstärkungsfasern nach Schürmann, modifiziert [34]

Je nach Eigenschaftsprofil finden die Fasern Anwendung in unterschiedlichen Bereichen beginnend von der Luftfahrt- und Automobilindustrie bis hin zum Bauwesen. Nachfolgend wird auf die gängigen Fasern (Carbon, Glas, Aramid, Natur) eingegangen, die für den Einsatz in der Großserie auf Grund ihrer Eigenschaften oder des wirtschaftlichen Vorteils geeignet sind [34]. Tab. 2 zeigt die Preise der zu betrachtenden Fasern. Es ist zu erkennen, dass die Kohlenstofffaser mit mindestens 20 €/kg am teuersten ist. Dies liegt unter anderem am komplexen und energieintensiven Herstellungsprozess. Der Preis für die Aramidfaser hingegen beträgt ca. ein Fünftel des Preises der Kohlenstofffaser. Die Glas- und Naturfaser sind am günstigsten, wobei für die

Verarbeitung von Naturfaser noch zusätzliche Trocknungs- und Verarbeitungsprozesse bedacht werden müssen.

Tab. 2: Kosten herkömmlicher Verstärkungsfasern in €/kg [44]

Faser	Kosten [€/kg]
Aramid	~3,7
Kohlenstoff	~20-60
Glas	~1,8
Natur	~0,5-1,0

2.5.1 Aramidfaser

Der Begriff Aramid beschreibt im Allgemeinen aromatische Polyamide. Die daraus gesponnenen Fasern wurden erstmals in den 60er Jahren von der *Fa. Du Pont* unter dem Markennamen *Nomex* (PmPI) kommerziell angeboten. 1972 folgte eine zweite Aramidfaser unter dem Markennamen *Kevlar* (PPTA), die bis heute ein großes Einsatzgebiet dank der herausragenden Eigenschaften besitzt. Da Aramide auf Grund ihres molekularen Aufbaus kein deutliches Schmelzverhalten zeigen, wurde für ihre Herstellung ein spezielles Spinnverfahren, der Lösungsspinnprozess, entwickelt. Bei diesem Prozess wird die Faser aus einer flüssig-kristallinen Polymerlösung (Lösungsmittel: Schwefelsäure) versponnen und anschließend gewaschen und gereckt. In Abb. 13 ist der chemische Aufbau der Aramidfaser zu sehen [34] [38].

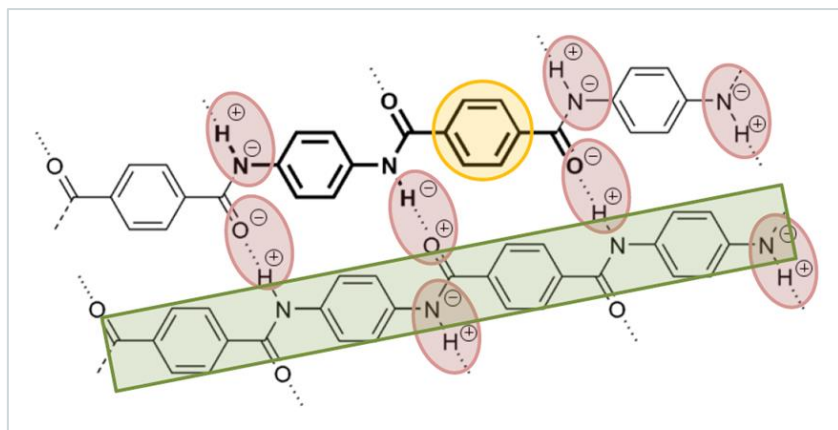


Abb. 13: Chemischer Aufbau Aramidfaser, modifiziert [35]

Das Besondere an der Aramidfaser ist die gestreckte Polymerkettenkonfiguration. Durch den Aufbau der einzelnen Moleküle wird eine Kettenfaltung verhindert, sodass stabförmige Strukturen entstehen. Die aromatischen Ringe (orange) zusammen mit den kovalenten Bindungen entlang der Polymerkette (grün) und den entstehenden Wasserstoffbrücken (rot) sorgen für eine

starke Anisotropie und eine dementsprechend hohe Zugfestigkeit. Neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften zeichnet sich das Aramid ebenfalls durch eine hohe Temperaturbeständigkeit aus. Nachteilig sind eine geringe UV-Stabilität sowie das hygroskopische Verhalten des Materials. Anwendungsgebiete sind bspw. feuerfeste Kleidung, schussichere Westen und schnittfeste Handschuhe, aber auch Druckbehälter, Bremsen und Kupplungsbelege [34] [38].

2.5.2 Kohlenstofffaser

Nach der Entdeckung der ersten Kohlenstofffaser um 1880 begann die Laufbahn der Carbonfaser in den 50er Jahren, als in der Luftfahrtindustrie ein Material mit geringer Dichte und einem hohen Elastizitätsmodul gesucht wurde. Die Faser selbst ist ein Schichtwerkstoff aus einzelnen Graphitschichten mit einer 100 %igen Parakristallinität. Die Herstellung erfolgt primär über die Textilfaser PAN (Polyacrylnitril) und verläuft vereinfacht in drei Stufen, von der Oxidation (1) über die Carbonisierung (2) bis zur Graphitierung (3). Abb. 14 zeigt einen Ausschnitt von der 2D-Graphitstruktur, wie sie in der Kohlenstofffaser vorherrscht.

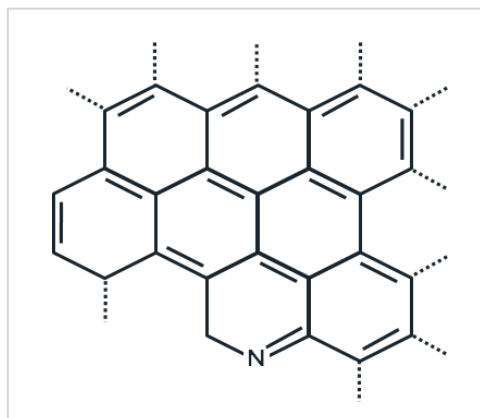


Abb. 14: Chemischer Aufbau Graphitstruktur

Die C-Fasern besitzen herausragende mechanische Eigenschaften. Als Kennwerte sind eine geringe Dichte (etwa 1,8 g/cm³), hohe Festigkeiten sowie eine außerordentliche Steifigkeit zu nennen. Das Spannungs-Dehnungs Verhalten dieser Faser ist zudem progressiv, sodass bei erhöhter Belastung der E-Modul steigt. Nachteilig wirken sich der hohe Preis und die anspruchsvolle Verarbeitung aus. Ebenfalls verfügt die Kohlenstofffaser über ein gutes Brandverhalten, das jedoch im Verbund je nach Matrix geschmälert wird. Anwendungen finden sich bspw. in der Luftfahrtindustrie oder der Automobilindustrie, wo ganze Monocoques aus Carbon gefertigt werden. Weiterhin wird die C-Faser in Verstärkungen von Windrädern und bei Sportartikeln eingesetzt [34] [35] [38].

2.5.3 Glasfaser

Die Glasfaser wurde 1912 erstmals als textile Endlosfaser im industriellen Maßstab produziert. Als Rohstoffe werden – je nach späterem Anwendungsfall – Quarzmehl, Kalkstein, Colemanit, Kaolin und unterschiedliche Oxide eingesetzt [45]. Die Herstellung erfolgt aus einer Glasschmelze bei hohen Temperaturen (1400 - 1600°C) über das Düsenziehverfahren. Dabei können die Eigenschaften der Fasern durch die Abzugsgeschwindigkeit variiert werden. Allgemein gilt, dass die Festigkeit der Einzelfilamente bei abnehmendem Durchmesser steigt. Die guten mechanischen Eigenschaften verdankt das Glas den kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff, wobei der molekulare Aufbau einem dreidimensionalen Netzwerk gleicht [41]. Abb. 15 zeigt den schematischen Aufbau von Glasfasern. Im Wesentlichen kann zwischen sechs Arten (E-, R/S-, M-, C-, D-, Q-) von Glasfasern unterschieden werden, wobei die E-Glasfaser industriell den größten Absatz findet.

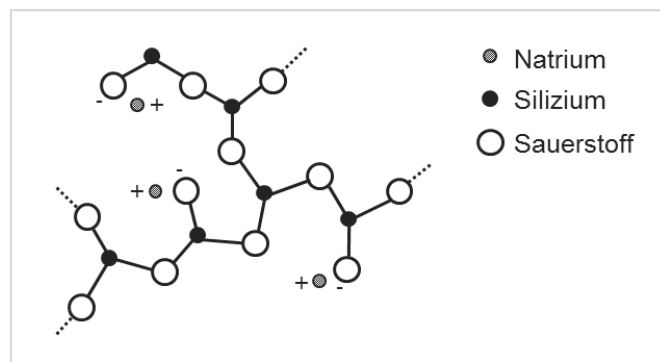


Abb. 15: Schematischer Aufbau einer Glasfaser, modifiziert [38]

Im Gegensatz zur Carbonfaser, ist die Glasfaser im eingebetteten Zustand transparent und somit im eingefärbten Verbund unauffällig. Sie verfügt über eine gute Formbarkeit sowie eine hohe Bruchdehnung. Zusätzlich ist sie ein elektrischer und thermischer Isolator. Nachteilig sind bspw. der geringe Elastizitätsmodul und die hohe Knickempfindlichkeit [34] [35] [38].

2.5.4 Naturfaser

Naturfasern haben zumeist einen pflanzlichen Ursprung, können jedoch auch tierischer oder mineralischer Natur sein. Bezogen auf pflanzliche Fasern (Pflanzenfasern) wird zwischen Hart- und Weichfasern unterschieden. Die Strukturen und Eigenschaften der Fasern werden hierbei durch die sog. Sklerenchymfasern bestimmt. Die Hauptbestandteile jeder Pflanzenfaser sind Zellulose, die das Strukturgerüst der Sklerenchymfasern bildet, Hemizellulose und Lignin, welches als eine Art Klebstoff zwischen den Zellulosemolekülen dient [38]. Abb. 16 zeigt beispielhaft ein Zellulosemolekül.

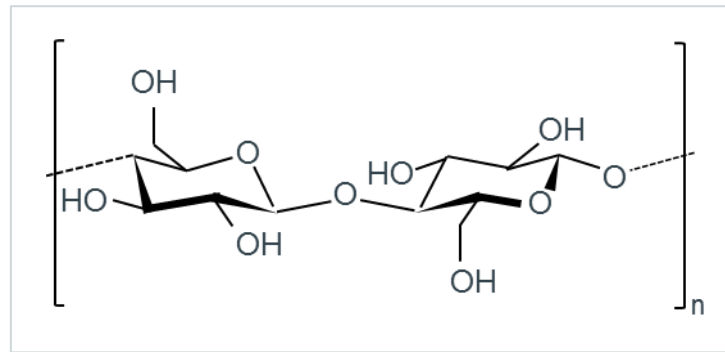


Abb. 16: Zellulosemolekül, modifiziert [38]

Die Herstellung der Naturfasern erfolgt im Allgemeinen über die Röste. Nach dem Raufen der Pflanzen werden die Fruchtkapseln abgetrennt (Riffeln) und die Stengel offen für eine Feldröste oder in Wasserbassins für die Wasserröste gelagert. Anschließend folgt das Brechen und Schwingen, wodurch kleine Holzteilchen entfernt werden. Über einen Auskämmprozess, genannt Hecheln, werden die restlichen überflüssigen Bestandteile abgetrennt und die Fasern im Spinnprozess verarbeitet [38]. Die Eigenschaften von Naturfasern werden stark von Witterungsbedingungen, dem Wachstumsverhalten und dem Aufbau der Pflanze beeinflusst. Schwankungen der mechanischen Kennwerte gängiger Naturfasern liegen meist zwischen 3-5 %, was unter anderem auf die hygroskopischen Eigenschaften zurückzuführen ist. Neben dem dichtetespezifischen Vorteil ist ein weiterer Nutzen der Naturfaser die CO₂-Neutralität [38].

2.6 Halbzeuge

Bei Halbzeugen kann die Struktur je nach Herstellungsverfahren in flächig oder dreidimensional unterschieden werden. Die wichtigsten flächigen Halbzeuge sind Gewebe, Gelege, Geflechte, Gestricke und Vliesstoffe [46]. Abb. 17 zeigt verschiedene Halbzeugformen am Beispiel von Textilglaserzeugnissen [35]. Das farblich hervorgehobene Gewebe im Bereich der Endlosgarne kennzeichnet die Halbzeugform, die Basis der FVK-Verstärkung in dieser Arbeit ist. Der Großteil textiler Halbzeuge basiert auf Monofilamenten, die vor dem Herstellprozess als Garne, Zwirne, Rovings oder Kurzfasern vorliegen. Im weiteren Verlauf wird auf UD-Gelege und Gewebe, mit und ohne Imprägnierung eingegangen.

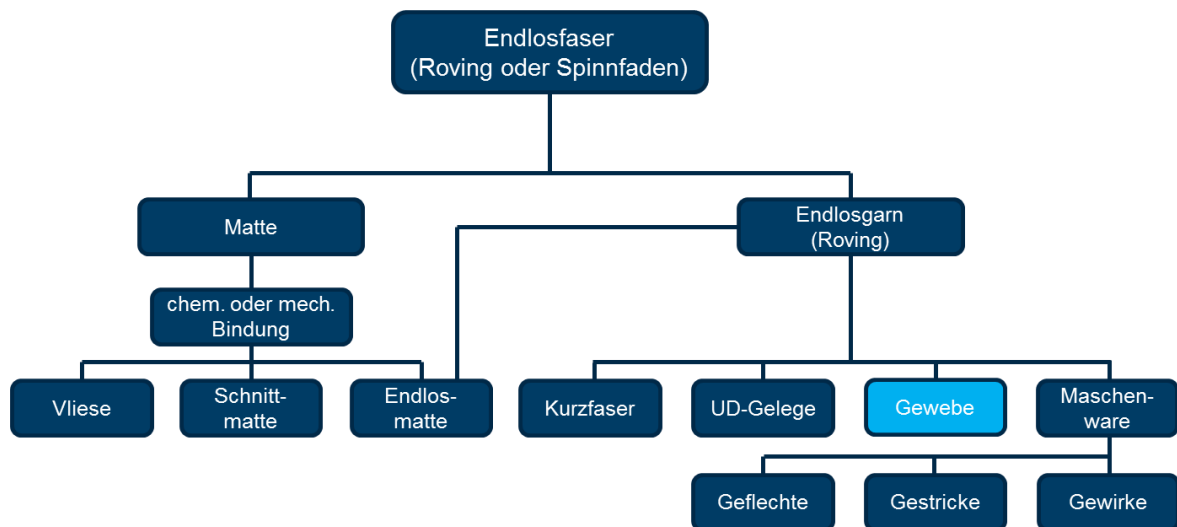


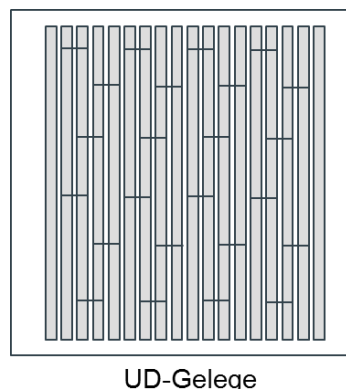
Abb. 17: Verschiedene Textilfaserzeugnisse, modifiziert [35]

2.6.1 Gerichtete flächige Halbzeuge

Gelege

Gelege bestehen aus einzelnen, losen Rovings die über Klebvliese oder durch partielles Vernähen zusammengehalten werden (Abb. 18). Die Anordnung der Rovings ist hierbei beliebig und kann von unidirektional (UD) bis multiaxial variieren. Bei UD-Gelegen bietet sich der Vorteil, dass die Fasern gerichtet, ohne Ondulation vorliegen und demzufolge die Eigenschaften der Fasern maximal genutzt werden können. Entsteht jedoch eine Belastung quer zum UD-Gelege, versagt dieses im Verbund schon unter geringer Last an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix [46].

Multiaxialgelege bestehen hingegen aus unterschiedlich orientierten Schichten, die durch einfaches Vernähen untereinander fixiert werden. Die einzelnen Rovings in den Schichten liegen auch hier gerichtet und ohne Ondulation vor. Weiterhin ist es möglich die Multiaxialgelege zu dreidimensionalen Preforms zusammen zu heften. Durch die recht starre Verbindung zwischen den einzelnen Rovings, ist die Umformung begrenzt [46].



UD-Gelege

Abb. 18: Schema eines UD-Geleges [36]

Gewebe

Als zweidimensionales Gewebe wird ein Textil mit Rovings bezeichnet, die im fertigen Produkt im rechten Winkel zueinander vorliegen und somit eine bidirektionale Verstärkungswirkung aufweisen. Die Kreuzungspunkte von Schuss- und Kettfaden, wobei der Kettfaden in Produktionsrichtung verläuft, werden Bindung oder Gewebekonstruktion genannt. Allgemein können Gewebe gut weiterverarbeitet werden, da ihr Aufbau ein Verschieben der Rovings untereinander verhindert. Die Grundbindungen unterteilen sich in Leinwand-, Köper- und Atlasbindung, von denen weitere Bindungen abgeleitet werden können [45] [46]. Folgend wird sich auf die Erläuterung der erwähnten drei Arten beschränkt.

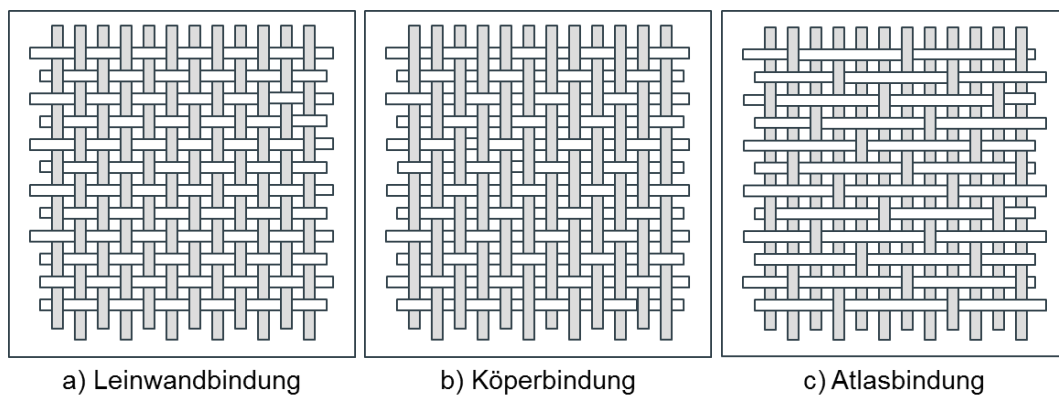


Abb. 19: Schema unterschiedlicher Bindungen:
a) Leinwandbindung, b) Köperbindung, c) Atlasbindung [36]

Leinwandbindung (Abb. 19 a)

Die allgemein gebräuchlichste Bindungsart ist die Leinwandbindung. Auf Grund der gegenseitigen Umschlingung von Kett- und Schussfaden, besitzt das Leinwandgewebe die höchste Verkreuzungsdichte pro Flächeneinheit und gleichzeitig die höchste Fadenondulation. Letzteres bewirkt eine Reduktion der Festigkeit und des E-Moduls. Das Gewebe ist formstabil, weist aber eine schlechte Drapierbarkeit auf [45].

Köperbindung (Abb. 19 b)

Bei einer Köperbindung verläuft der Schussfaden über mehrere Kettfäden hinweg, bevor er einen Kettfaden unterkreuzt. So entsteht ein Gewebe mit einem schräg verlaufenden Oberflächenmuster. Die Drapierung über komplexe Geometrien lässt sich mit einer Köperbindung recht gut abbilden, wohingegen die Schiebefestigkeit innerhalb des Gewebes abnimmt. Die mechanischen Eigenschaften sind gegenüber einer Leinwandbindung leicht erhöht. Grund hierfür ist die geringere Fadenondulation bei der Köperbindung [46].

Atlasbindung (Abb. 19 c)

Bei einer Atlasbindung ist eine sehr geringe Faserondulation vorhanden. In der Regel verläuft der Schussfaden über sieben Kettfäden, bevor er den nächsten Kettfaden unterkreuzt. Die geringe Fadenverkreuzung führt zu langgestreckten Fadenbereichen mit hohen mechanischen Eigenschaften und einer ausgeprägten Drapierbarkeit. Die Schiebefestigkeit und das zugehörige Handling nehmen hingegen ab [46].

Eigenschaften der Grundbindungen

Neben der grundsätzlichen Wahl des Materials hängen die Eigenschaften von dem Verhältnis zwischen der Länge eines Gewebes zur verwendeten gestreckten Faserlänge ab. Je nach Bindungsart liegen die Fäden bspw. bei einer Atlasbindung im Großteil des Gewebes gestreckt vor. Die Krümmung, also die Ondulation ist gering, sodass auch die mechanische Beanspruchung während des Webvorgangs gering ist. Infolgedessen können bei Lasteinleitung die mechanischen Eigenschaften des Fasermaterials besser genutzt werden, als bspw. bei einer Leinwandbindung mit hoher Ondulation [45]. Es ist anzunehmen, dass ein Gewebe mit Atlasbindung gegenüber einer Leinwand- oder einer Köperbindung die höchste Festigkeit aufweist. CHERIF [45] geht auf weitere Struktureigenschaften der Grundbindungen ein, die im Besonderen für die Herstellung und den Einsatz von Verbundwerkstoffen wichtig sind. Tab. 3 gibt einen Überblick über die Struktureigenschaften. Es ist zu erkennen, dass jeder Bindungstyp Vor- und Nachteile mit sich bringt, die entsprechend der Verarbeitung und den Anforderungen des späteren Einsatzes bewertet werden müssen [45].

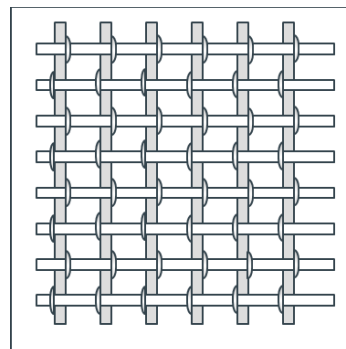
Tab. 3: Übersicht der Struktureigenschaften nach Cherif ($0 \triangleq$ gering; $++ \triangleq$ hoch) [45]

Eigenschaft	Leinwand	Köper	Atlas
Schiebefestigkeit	++	+	0
Strukturdeformation	++	+	0
Einzelfadenauszugskraft	++	+	0
Biegefestigkeit	++	+	0
Permeabilität	0	+	++
Drapierbarkeit	0	+	++
Handhabung	++	+	0
Mech. Eigenschaften im Verbund	0	+	++

Gittergewebe

Gittergewebe besitzen einen Deckungsgrad $< 100\%$. Dabei kann die Struktur, je nach Anwendungsfall, zwischen den Gitterabständen und der Bindungsart variieren. Gebräuchlich sind bspw. das Verkleben von Fäden zu einem biaxialen Gelege oder das Weben mit Leinwand- oder Dre-

herbindung. Dabei stellt Letzteres eine Sonderform des Webens dar [46]. Abb. 20 zeigt das Schema einer Dreherbindung. Der Einsatz eines Gittergewebes basiert auf dem Grundgedanken der minimal nötigen Endlosfaserverstärkung. Es zeichnet sich durch einen geringen Materialeinsatz aus, der mit einer Reduzierung des Flächengewichts einher geht. Durch gezielte Platzierung der Fasern entlang der Lastpfade wird eine unnötige flächige Verstärkung vermieden. Zusätzlich ermöglicht die offene Struktur eine Verkrallung mit der Matrix, was zu einer guten Faser-Matrix Interaktion führt und für eine gute Kraftübertragung im Verbund sorgt.



Dreherbindung

Abb. 20: Schema einer Dreherbindung [36]

Im Gegensatz zu den zuvor erwähnten Grundbindungen verfügt ein Drehergewebe über mindestens zwei Kettfadensysteme. Diese werden als Steherfaden und Bindefaden bezeichnet. Dabei umschlingen die beiden Kettfäden nach jedem Schusseintrag den Schussfaden, wodurch die Verschiebefestigkeit und auch das Handling des Gewebes verbessert werden. Zusätzlich wird die Spannung des Stehfadens erhöht, was die Ondulation der Kette und somit die Dehnung in Kett- richtung verringert. Die geringere Fadendichte in Kett- und Schussrichtung ermöglicht außerdem ein gutes Drapierverhalten und den Einsatz in komplexen Geometrien. Beispielsweise ist die Permeabilität, d.h. die Durchdringungsfähigkeit mit Matrixmaterial und die Verschiebefestigkeit eines Drehergewebes für den Einsatz im industriellen Spritzguss von Vorteil [45] [47].

2.6.2 Vorimprägnierte flächige Halbzeuge

Vorimprägnierte flächige Halbzeuge unterscheiden sich sowohl anhand der verwendeten Faser und deren Ausrichtung bzw. Bindungsart als auch durch die Matrix und den Imprägnierungsgrad des Halbzeugs [45]. Für den Serieneinsatz kommen vornehmlich Kohlenstoff- und Glasfasern mit PP- und PA-Matrizes zum Einsatz. Neben dem plattenförmigen ‚Organoblech‘ wird im Folgenden auch das imprägnierte UD-Gelege erläutert.

Organoblech

Das Organoblech an sich beschreibt ein vollständig imprägniertes und konsolidiertes plattenförmiges Halbzeug, welches in der textilen Komponente meistens als Gewebe vorliegt. Die Bezeichnung ‚Blech‘ bezieht sich dabei auf die Verarbeitung durch Umformung der Verbunde. Aktueller Marktführer in der kontinuierlichen Herstellung von Organoblechen ist die Firma *Bond Laminates* die ihre Produkte unter dem Namen *Tepex* vertreibt. Bei der Herstellung von *Tepex* wird dem trockenen Textil eine thermoplastische Folie zugeführt, die in einer beheizten Doppelbandpresse (Abb. 21) über hohen Druck und eine definierte Abzugsgeschwindigkeit mit dem Textil verheiratet wird. Die Temperatur der Doppelbandpresse liegt dabei über dem Schmelzpunkt des Polymers. Die Weiterverarbeitung der hergestellten Organobleche erfolgt größtenteils über Umformpressen oder im Spritzgussverfahren, dem sogenannten In Mould Forming (Kapitel 2.8.2). Bei zuletzt genanntem wird das Halbzeug zuerst temperiert und innerhalb einer kurzen Übergabezeit im Werkzeug positioniert. Dort wird es durch das Schließen der Kontur geformt und anschließend hinterspritzt. Durch geschickte Steuerung der Prozesse können kurze Zykluszeiten und hohe Oberflächenqualitäten erzeugt werden [45] [48].

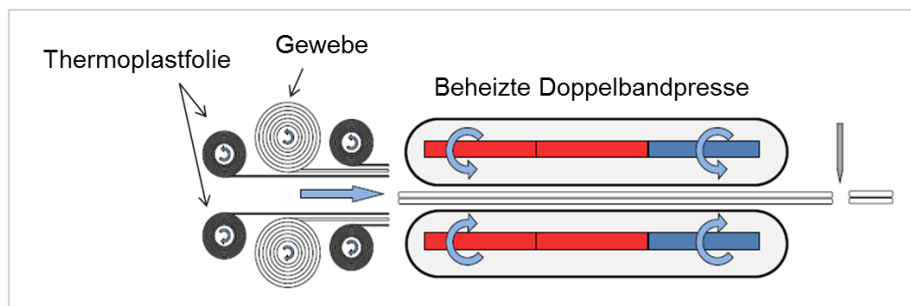


Abb. 21: Organoblechherstellung über beheizte Doppelbandpresse, modifiziert [48]

Imprägniertes UD-Gelege

Bei einer UD-Gelege Verstärkung handelt es sich um ein unidirektionales Gelege, welches flächig imprägniert und später als Rollenware verkauft wird. Dabei kann die Imprägnierung der Fasern über die Beschichtung mittels Polymerfolien oder -pulver oder durch das Tränken mit niederviskoser Matrix erfolgen. Gängige Methoden sind außerdem das Lösungsmittelimprägnieren sowie das Einbringen und spätere Verpressen von thermoplastischen Fasern. Allgemein werden die Fasern bei der Herstellung kontinuierlich von Spulen abgewickelt, imprägniert und abschließend zwischen zwei Walzen unter hoher Abzugsgeschwindigkeit konsolidiert. Ein Vorteil, den UD-Gelege bieten, sind die mechanischen Eigenschaften entlang der gestreckt vorliegenden Fasern. Ebenfalls ist ein hoher Imprägnierungsgrad im Halbzeug vorhanden, da keinerlei Bindungspunkte zwischen den Fasern vorliegen. Das Anwendungsfeld der UD-Gelege ist auf Bau-

teile beschränkt, die nur partiell in eine Richtung (unidirektional) belastet und verstärkt werden müssen. Für eine mehrachsige Belastung (multidirektional) können mehrschichtige UD-Gelege (MD-Gelege) mit unterschiedlichen Ausrichtungen erzeugt werden [45].

2.6.3 Einbringen von Faserverstärkungen - Tailored Fibre Placement

Das Tailored Fibre Placement (TFP) ist ein Verfahren zur Verstärkung flächiger Halbzeuge. Dabei wird sich an dem Prinzip des Stickens orientiert, um lokal gezielt ausgerichtete Faserrovings aufzubringen. Somit ist es möglich komplexe Bauteilstrukturen anwendungsspezifisch zu funktionalisieren [45]. Nach [49] bietet das TFP folgende Vorteile:

- Winkelunabhängige Funktionsmaterialablage
- Hohe Positioniergenauigkeit bei modernen CNC Stickautomaten ($\pm 0,3$ mm)
- Mögliche Fertigung von zwei- und dreidimensionalen textilen Halbzeugen mit beanspruchungsgerechter und lokal variabler Verstärkungsfadenanordnung in x-, y- und z-Richtung
- Vermeidung von Fasermaterial- und Matrixanhäufungen im späteren Bauteil durch eine bauteilgerechte Ablage der Verstärkungsfäden
- Endkonturnahe Fertigung zur Einsparung von Material bzw. Reduzierung von Abfall
- Problemlose Verarbeitung von Natur-, Glas-, Aramid-, Kohlenstoff- und Keramikfasern sowie textilfremden Elementen.

Für das TFP ist ein zusätzlicher Fadenleger notwendig, der das Funktionsmaterial zum Stickkopf führt. Dabei ist der Fadenleger frei drehbar vor der Sticknadel gelagert, um eine variable Faserablage (x-, y-Richtung) zu gewährleisten. Die Befestigung des Funktionsmaterials erfolgt über einen Doppelsteppstich auf dem Stickgrund. Parallel führt der Stickrahmen eine Zickzackbewegung aus, sodass der Roving beispielsweise flach oder gebündelt vorliegt [35] [45] [47].

2.7 Beschreibung der auftretenden Grenzflächen

Die Phasengrenze zwischen der formgebenden polymeren Matrix und der Verstärkungsfasern ist ein wesentlicher Faktor für die Eigenschaften des Faserverbands. Innerhalb dieser Grenze treten Wechselwirkungen auf, die bis in den molekularen Bereich wirksam werden. Ebenfalls ist es möglich durch Zusatzstoffe vermittelnde Substanzschichten aufzubauen. Nachfolgend soll eine ganzheitliche Betrachtung von der molekularen Ebene bis zur Applikation funktioneller Ausrüstung getätigt werden.

2.7.1 Ausrüstung der Verstärkungsfasern am Beispiel der Glasfaser

Die in Kapitel 2.5.3 erwähnte Knickempfindlichkeit der Glasfaser führt zu der Notwendigkeit einer Beschichtung nach dem Spinnprozess. Die aufgetragene, als Schlichte bezeichnete, Beschichtung verringert die Reibung zwischen den Einzelfilamenten. Ebenfalls reduziert sie die Belastung beim Aufspulen auf Kerne und bei der textilen Verarbeitung. Für die Faseroberflächenmodifizierung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche die Faseroberfläche entweder aufrauen oder mit polaren Gruppen versehen. Es wird zwischen nasschemisch, also durch Aufbringen einer wässrigen Lösung, physikalisch/chemisch durch oberflächenaktivierende Methoden, wie der Plasma- und Coronatechnologie und rein chemischer Methode, mit Hilfe von Reaktivgasen, unterschieden. Einige Nasstextilschlichten beinhalten Gleitmittel auf Basis von Stärke und Ölen, die die Faseroberfläche während der späteren Verarbeitung, beispielsweise im Webprozess schützen. Ist das textile Flächengebilde produziert, kann es zusätzlich mit matrixkompatibler Schlichte (bspw. im Tauchverfahren) versehen werden. Allerdings sind diese zusätzlichen Arbeitsschritte sehr kostenintensiv, weshalb Schlichten entwickelt werden, bei denen die Gleitmittel auf der Oberfläche verbleiben können, ohne die adhäsiven Eigenschaften zwischen Matrix und Faser im Werkstoffverbund nachteilig zu beeinflussen. Neben Haftmitteln, die kovalente Bindungen zwischen der Glasoberfläche und der Matrix schaffen, besitzen die Schlichten auch Filmbildner und Netzmittel. Filmbildner schützen die Filamente vor gegenseitiger Reibung und können z.B. aus Polymeren, Acrylestern oder für duroplastische Matrixsysteme aus Epoxidharzemulsionen bestehen. Netzmittel sorgen dafür, dass die Oberflächenspannung der wässrigen Schlichte herabgesetzt wird und so die Filamente besser benetzt werden können [45] [47] [50].

Da der Fokus dieser wissenschaftlichen Abhandlung auf Polypropylen als Matrixmaterial liegt, kann für die beispielhafte chemische Zusammensetzung einer Schlichte der Teschner [50] herangezogen werden (Tab. 4). Es ist zu beachten, dass eine Schlichte noch weitere Bestandteile, wie Antistatika oder Emulgatoren besitzt. Sowohl die Analyse als auch die Herstellung dieser oberflächenmodifizierenden Chemikalien ist komplex, zeitaufwendig und mit Know-How der verarbeitenden Industrie verbunden [45] [50]. Die folgend aufgeführte Zusammensetzung einer PP-geeigneten Schlichte ist demnach für diese Arbeit als gegeben anzusehen.

Tab. 4: Mögliche Zusammensetzung einer Glasfaserschlichte für Polypropylen [50]

	Bestandteil	Masseprozent [wt.%]
1.	Vinylacetatacrylcopolymer	5,00
2.	Polyolefinemulsion (25 %)	12,00
3.	Diammoniumhydrogenphosphat	0,10
4.	Cat X-Alkylimidazolinderivat	0,05
5.	Aminosilan A-1100	0,60
6.	Entionisiertes Wasser	82,25

Das in Tab. 4 beschriebene Aminosilan A-1100 ist ein γ -Aminopropyltriethoxysilan, dessen Funktionsweise im nachfolgenden Kapitel näher erläutert wird. Eine geeignete Schlichte sollte zusammenfassend folgende Eigenschaften besitzen:

- Gute Bündelungseigenschaften und Abriebfestigkeit für die Faserbündel
- Reibungsschutz während der Herstellung und Weiterverarbeitung
- Spreizbarkeit der Rovings bei Veredelungsprozessen oder Funktionalisierungen
- Antistatische Wirkung und Korrosionsschutz
- Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix; in dem vorliegenden Fall unter Umgebungsbedingungen im Motorraum.

2.7.2 Grenzfläche zwischen Faser und Matrix

Um auftretende Kräfte optimal von der Matrix auf die Verstärkungsfaser übertragen zu können, sind möglichst große adhäsive Kräfte im Verbund, speziell an der Faser-Matrix Grenzfläche nötig. Dabei wird grundsätzlich zwischen drei Adhäsionsmechanismen unterschieden (Abb. 22). Die höchste Kraftübertragung erzielen die kovalenten Bindungen, gefolgt von den Dipolkräften und der mechanischen Verankerung.

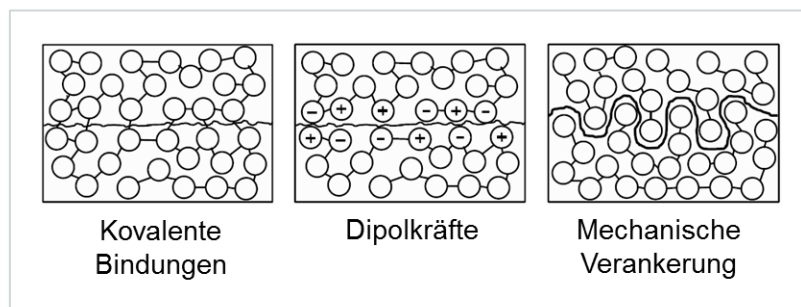


Abb. 22: Adhäsionsmechanismen, modifiziert [45]

Die im vorigen Kapitel angesprochene Schlichte unterstützt den Aufbau einer chemischen Bindung zu der Matrix. Das dreidimensionale Netzwerk der Glasfaser (Kapitel 2.5.3) besitzt an den

äußeren Randbereichen freie Silanolfunktionen, dessen Hydroxylgruppen es ermöglichen, chemische Bindungen mit beispielsweise dem Aminopropyltriethoxysilan einzugehen [45]. Vereinfacht sieht die Oberfläche einer Glasfaser entsprechend Abb. 23 aus.

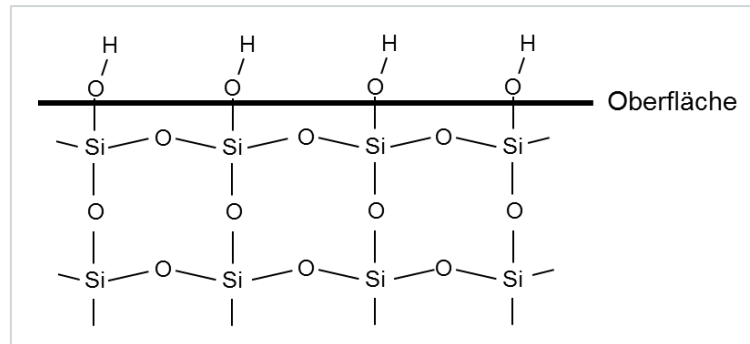


Abb. 23: Schematischer Glasfaseraufbau mit Hydroxylgruppen an der Oberfläche, modifiziert [45]

Bevor die Silane an der Faser in wässriger Lösung anbinden können, werden sie hydrolysiert. Am Beispiel von Aminopropyltriethoxysilan, einem aliphatischen Amin, wird dieser Vorgang in Abb. 24 veranschaulicht.

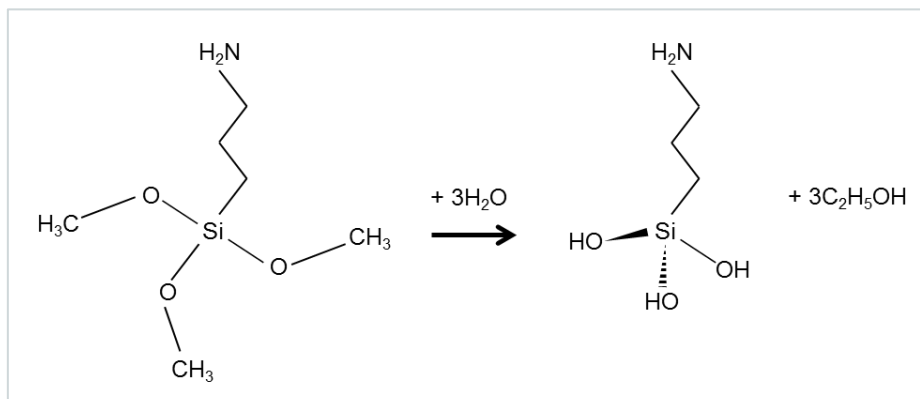


Abb. 24: Hydrolyse von Aminopropyltriethoxysilan

Die Hydroxylgruppen des nun vorliegenden Silanol reagieren unter Abspaltung von Wasser mit den Hydroxylgruppen an der Glasoberfläche. Hierbei legt sich das entstandene Produkt als ca. 5 nm dicke Schicht rund um die Glasfaser. Mit diesem Schritt ist die haftvermittelnde Komponente am Glas angebracht (Abb. 25).

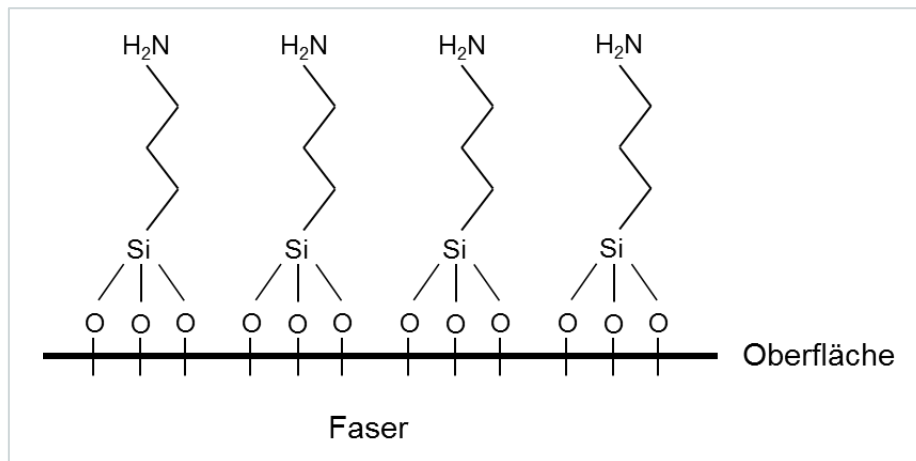


Abb. 25: Schematische Glasfaseroberfläche mit aliphatischen Aminen als Haftvermittler, modifiziert [45]

Da Polypropylen als unpolares Polymer keine reaktiven Zentren besitzt, kann es keine kovalenten Bindungen zu einer der abgebildeten Amingruppen des Haftvermittlers eingehen. Demzufolge muss das Polymer chemisch verändert werden. Hierfür wird ein Haftvermittler, wie bspw. das *Scona* (Maleinsäureanhydrid) der Firma *BYK* herangezogen. Über die sogenannte Pfropfung, welche in Festphasenreaktoren oder in der Schmelze stattfindet, lagert sich eine reaktive Komponente an die Hauptkette des PP an. Der mengenmäßige Einsatz von Haftvermittler in der Matrix liegt oft bei unter 2 % und verbessert durch die gesteigerte Haftfestigkeit die Steifigkeit und Zugfestigkeit des späteren Verbunds bereits signifikant [51]. Abb. 26 macht deutlich, wie das Maleinsäureanhydrid unter Wasserabspaltung eine Imidbindung mit dem Stickstoff des Aminosilans eingeht.

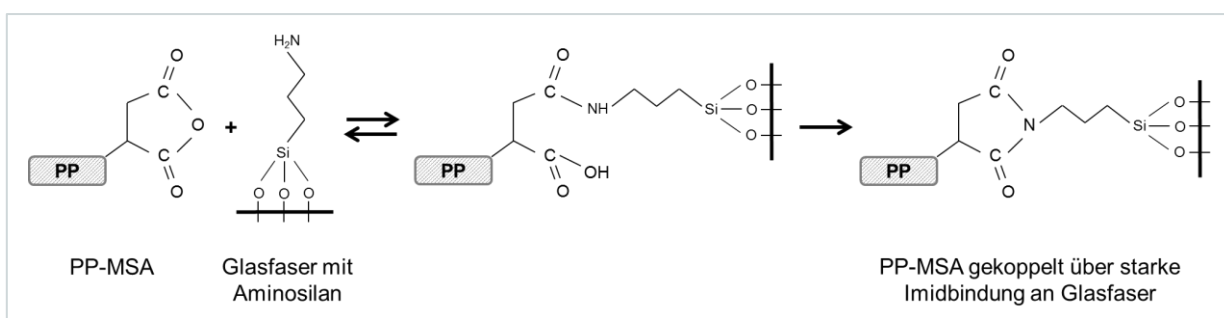


Abb. 26: Ausbildung einer kovalenten Bindung zwischen MSA-gepfropftem PP und dem Aminosilan einer Glasfaser-schlichte, modifiziert [51]

Es lässt sich festhalten, dass die Kopplung zwischen Glas und PP nicht direkt stattfinden kann. Vielmehr müssen beide Komponenten füreinander vorbereitet und abgestimmt werden. ETCHEVERRY ET AL. zeigen einen alternativen Weg auf, PP und Glasfaser miteinander zu verbinden. In der Untersuchung wird Polypropylen mit Hilfe von Katalysatoren direkt an die Glasfaseroberfläche polymerisiert, was zu sehr guten mechanischen Eigenschaften im Verbund führt. Der Kos-

ten-Nutzen Aufwand der erzeugten Mengen schließt jedoch die Anwendung in der Großserie aus [47] [52].

2.8 Grundlegende Verarbeitungsverfahren für Faserverbunde

Die Verarbeitungsverfahren von hybriden Werkstoffen richten sich nach der verwendeten Matrix und der jeweiligen Geometrie des Bauteils. Weiterhin schränken der angestrebte Faservolumengehalt und die zu produzierende Stückzahl die Auswahl an Verarbeitungsverfahren maßgeblich ein. Ein Überblick über das Zusammenspiel dieser Randbedingungen geben Abb. 27 und Abb. 28.

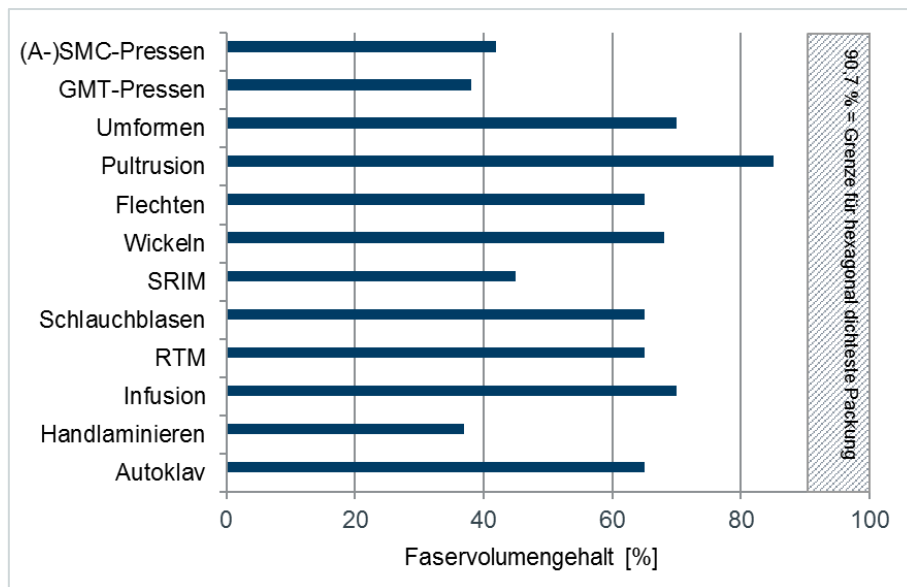


Abb. 27: Faservolumengehalte verschiedener FVK-Verfahren, modifiziert [53]

Zu dem Faservolumengehalt in Abb. 27 kann allgemein festgehalten werden, dass in einer optimalen, hexagonalen Packung ein maximaler Faservolumengehalt von 90,7 % möglich ist. Der technisch umsetzbare Fasergehalt liegt nur knapp darunter bei etwa 85 % und kann durch das Verfahren der Pultrusion realisiert werden. Mit der Mehrzahl der Verfahren ist ein mittlerer Faservolumengehalt von ~37-70 % im Bauteil erreichbar.

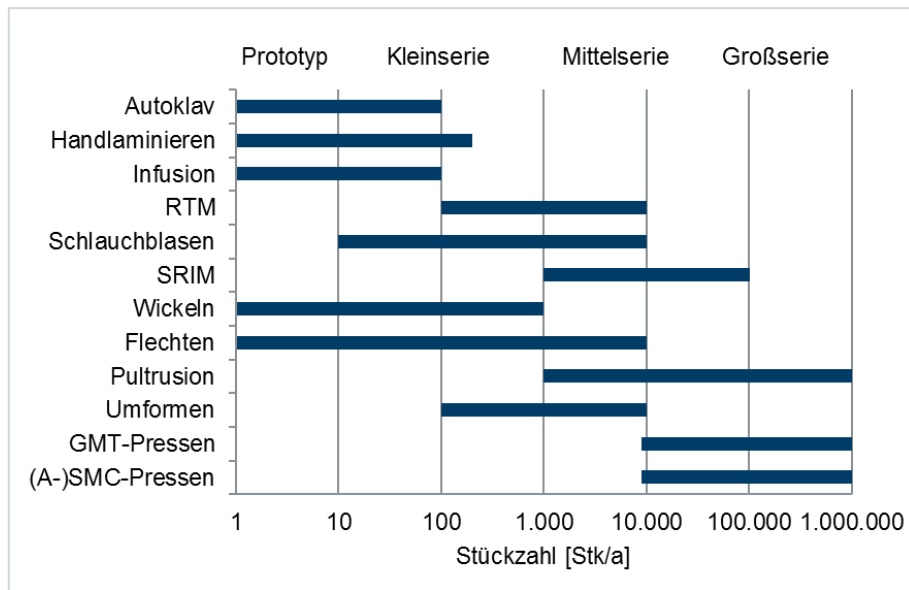


Abb. 28: FVK-Verfahren Wirtschaftlichkeit, modifiziert [53]

In Bezug auf die produzierten Stückzahlen (Abb. 28), reichen die Pressverfahren GMT und (A-) SMC sowie Pultrusion und SRIM an den Einsatz in der Großserie heran. Das GMT- und das (A-) SMC-Pressen beinhalten allerdings keine Endlosfasern, sodass diese nicht weiter betrachtet werden. Bei dem SRIM-Verfahren ist eine langsame und ungleichmäßige Durchtränkung des Faserhalbzeugs nachteilig anzuführen. Obwohl die Produktkapazität hoch ist, wird in der Automobilindustrie als Alternative das RTM-Verfahren verwendet. Auch wenn sich wissenschaftliche Abhandlungen [54] bereits mit der Verfahrensoptimierung für einen großserienfähigen Prozess beschäftigt haben, ist das Verfahren momentan nur für Kleinserien etabliert. Bei der Betrachtung höchst möglicher Fasergehalte und einfacher Profilgeometrien, stellt die Pultrusion eines der vielversprechendsten Verfahren dar [53]. Ein neues Verfahren, dessen Potentiale noch nicht endgültig bewertet sind, ist das In Mould Forming (IMF). Das IMF basiert auf der Kombination von Spritzguss und vorimprägnierten textilen Faserhalbzeugen, den sog. Organoblechen (vgl. Kapitel 2.6.2). Eine Weiterentwicklung des IMF zeigt [21] eine Möglichkeit, ein trockenes Gewebe durch einen besonderen Prozess- und Anlagenaufbau im Spritzguss zu imprägnieren und zu verarbeiten.

Neben dem aktuellen Herstellungsverfahren des Zielbauteils, werden im Folgenden lediglich das In Mould Forming und die spritzgießtechnische Direktimprägnierung ausführlicher erläutert.

2.8.1 Spritzgießen

Das Spritzgießen ist eines der wichtigsten formgebenden Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe. Trotz hoher Maschinen- und Werkzeugkosten, ist das Verfahren für Stückzahlen im Großserienbereich (> 1000 Stk./Tag) wirtschaftlich. Je nach Anlagengröße und Konfiguration der

Spritzgießmaschine, ist es möglich Teile von weniger als 1 mg bis zu knapp 140 kg zu fertigen. Die Zykluszeiten variieren dabei von wenigen Sekunden bis einigen Minuten, wobei der Nacharbeit nur ein geringer Teil der Zykluszeit zuzuschreiben ist [39].

Im Allgemeinen besteht eine Spritzgießanlage aus der Plastifiziereinheit, der Schließeinheit und dem Formwerkzeug (Abb. 29). Die formgebende Kavität im Werkzeug bestimmt maßgeblich die verfahrenstechnischen Größen, wie Formteilvermögen, Druckbedarf und Zuhaltkraft. Liegt die Wanddicke im Formteil oberhalb von 1,5 mm wird die Zykluszeit vornehmlich von der Wanddicke und der damit einhergehenden Kühlzeit bestimmt.

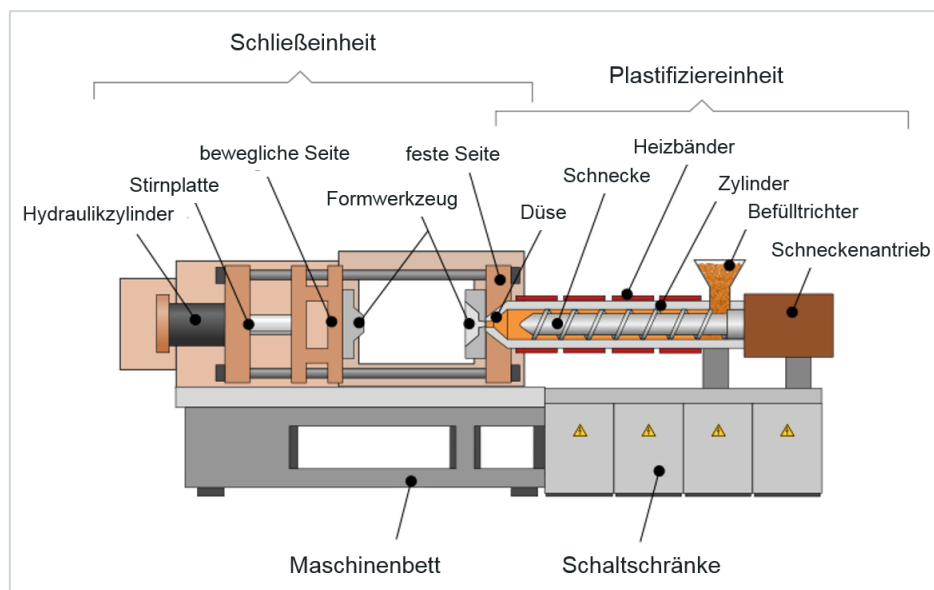


Abb. 29: Aufbau einer Spritzgussmaschine, modifiziert [55]

Ein Spritzgusszyklus lässt sich in vier Bereiche unterteilen: Einspritzen, Nachdruck aufbauen, Plastifizieren, Werkzeug öffnen und entformen [39]. Zu Beginn wird das Kunststoffgranulat über einen Trichter am Ende der Schnecke der Plastifiziereinheit zugeführt. Die Schnecke fördert das Granulat in Richtung Düse und schmilzt es unter Scherwirkung und Wärmeeintrag des beheizten Zylinders auf. Die geförderte Masse öffnet die Rückstromsperre im vorderen Teil der Schnecke und staut sich vor dem Schneckenkopf. Ist das wachsende Massepolster für die Formteillfüllung ausreichend, stoppt der Plastifiziervorgang und die Maschine ist bereit für den Schuss. Das Einspritzen erfolgt unter axialer Vorwärtsbewegung der Schnecke. Die Schmelze ($T_{\text{Mas}} \sim 200\text{--}450^\circ\text{C}$) strömt hierbei über die Düse und den Anguss in die Kavität bis eine Füllung von ca. 95-98 % erreicht ist. Die Rückstromsperre am vorderen Teil der Schnecke verhindert dabei, dass die Schmelze unter dem sich aufbauenden Druck zurückfließt. Die eingespritzte Masse erstarrt in der verhältnismäßig kalten Werkzeugkavität ($T_{\text{Wkz}} \sim 20\text{--}80^\circ\text{C}$) und weist bei der Abkühlung ein definiertes Schwindungsmaß auf (unterschiedlich für amorphe und teilkristalline Systeme).

me). Um Einfallstellen entgegen zu wirken und das Material zu kompaktieren, wird die Kavität nach dem Füllvorgang mit Nachdruck beaufschlagt. Die Nachdruckzeit hängt unmittelbar von dem Siegelpunkt ab. Parallel zum Nachdruck startet der Plastifizierungsvorgang für das nächste Bauteil. Nach dem Erkalten des Bauteils wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil mittels Auswerferstiften formfallend ausgeworfen oder für die Entnahme bspw. mit einem Roboter zurückgehalten. Je nach Bauteil erfolgt nach dem Spritzgussprozess eine weitere Bearbeitung von einem Werker [39]. Abb. 30 zeigt den Ablauf eines Spritzzyklus als schematische Darstellung.

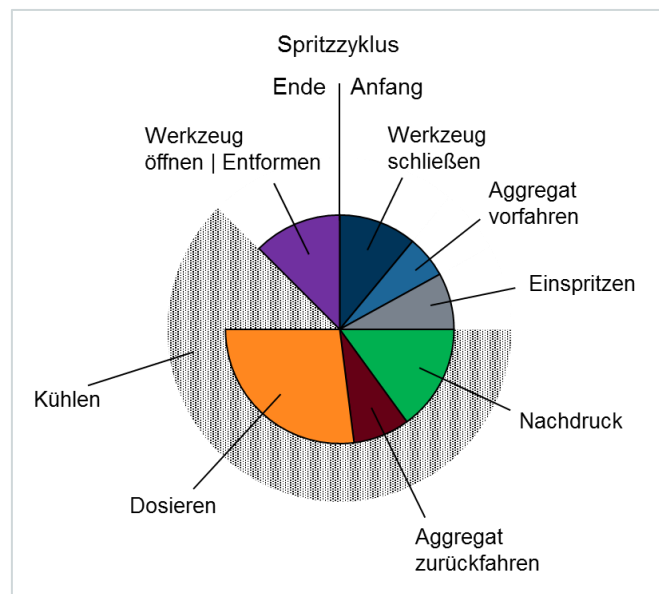


Abb. 30: Ablauf Spritzzyklus, modifiziert [56]

2.8.2 In Mould Forming

Das In Mould Forming ist ein erweiterter Spritzgussprozess, mit dem Ziel, die FVK-Verarbeitung in der Großserienfertigung zu realisieren. Der aktuelle Marktführer (*Bond Laminates*) für endlosfaserverstärkte Halbzeuge gibt an, den Verarbeitungsprozess innerhalb von 60 sek durchzuführen. Vorwiegend werden Organobleche als Halbzeuge eingesetzt, die innerhalb des Prozesses bei Schmelztemperatur umgeformt und angespritzt werden. Die Organobleche werden der Bauteilgeometrie entsprechend angepasst und als bereits fertige Zuschnitte von *Bond Laminates* geliefert. Im ersten Schritt heizt eine vorgelagerte Station (IR- oder Umluftofen) das Halbzeug auf eine matrixabhängige Temperatur auf. Der Heizprozess wird inline über Pyrometer verfolgt und kontrolliert. Ist die gewünschte Temperatur erreicht, wird das biegeschlafe Halbzeug in die Kavität des Spritzgusswerkzeugs überführt und bspw. auf Nadeln oder Dorne positioniert. Die Transferzeit in das Spritzguss- oder Umformwerkzeug muss so gestaltet werden, dass das Organoblech ausreichend Temperatur für den Umformprozess vorweist. In der Regel darf die Übergabe nicht länger als 10 sek dauern. Während des Schließvorgangs formt die Werkzeugkon-

tur den eingelegten Zuschnitt um und spritzt an vorgesehenen Stellen Rippen oder Funktionsteile an [48]. Auf der K-Messe 2013 zeigte Engel einen Ansatz für eine IMF-Serienlösung im One-Shot Prozess. Das Verfahren hat sich bis heute jedoch nicht in der Großserie etablieren können.

2.8.3 Spritzgießtechnische Direktimprägnierung

Die Herstellung sowie die Verarbeitung der im vorigen Kapitel beschriebenen endlosfaserverstärkten Halbzeuge sind mit erheblichen Kosten verbunden. Es gibt entsprechende Bestrebungen, „trockene“ Faserhalbzeuge direkt in einem Spritzgusswerkzeug mit der Kunststoffschmelze zu imprägnieren und einzubetten. Für diese Technik entwickelt TRÖLTZSCH [21] an der TU Chemnitz ein Verfahren, mit dem Ziel, einen möglichst hohen Imprägniergrad der Faserhalbzeuge zu erreichen und somit die mechanischen Eigenschaften zu erhöhen. Hierbei sind ein Handlingsystem zur Positionierung des biegeschlaffen Textils sowie gesonderte Spritzparameter, ähnlich einem Prägehub notwendig, mit dem die Schmelze stoßweise ins Werkzeug eingebracht wird. Das trockene Textil muss zusätzlich bebindert oder fixiert werden, damit die Geometrie der textilen Struktur dem Druck während des Einspritzvorgangs standhält. Das Hauptproblem der spritzgießtechnischen Direktimprägnierung stellt der Restporenanteil durch Luftblasen dar, die nach dem Erstarren der Schmelze nicht mehr entweichen können. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wird verfahrenstechnisch bspw. zusätzlich der Druck in der Kavität erhöht und eine Trocknung des textilen Einlegers vorgeschaltet [21].

Die NEUE MATERIALIEN FÜRTH GMBH löst in diesem Zusammenhang die Temperierung von Kohlefasereinleger über die Leitfähigkeit. Durch Anlegen eines Stroms an den Einleger wirkt die Verstärkung selbst als Widerstandsheizung. In Kombination mit einem in Stufen schließenden Werkzeug können sehr hohe Imprägniergrade erreicht werden [57]. Bei elektrisch nicht-leitenden Einlegern ist oben beschriebene Vorgehensweise keine Option, sodass die Temperierung der Verstärkungsstruktur in der Kavität erfolgen muss. Mit Hilfe von variothermer Prozessführung und einer vibrationsbeaufschlagten Schmelze kann im Rahmen des *Pafatherm* Projekts der TU Chemnitz ein partiell verstärktes Hutprofil mit angespritztem Randbereich erstellt werden [58].

3 Kunststoffmontageträger Tiguan

3.1 Bauteilbeschreibung

Der Kunststoffmontageträger oder auch Frontend-Montageträger befindet sich im Vorderbereich eines Fahrzeugs und dient der Befestigung unterschiedlicher Elemente wie beispielsweise dem Wasserkühler, dem Elektrolüfter oder dem Abstandsradarmodul. Zudem stützt er die Motorhaube und trägt deren Verriegelungsmechanismus. Allgemein kann der KUM in einen Ober- und Untergurt und zwei Seitengurte unterteilt werden. Der aktuelle Kunststoffmontageträger des *Tiguan* wird als Spritzgussbauteil im *Volkswagen Werk Wolfsburg* gefertigt. Die Herstellung erfolgt über Kaskadenspritzguss, um eine optimale Formfüllung des Bauteils zu ermöglichen. Dazu wird das Formteil über sechs sequenziell getaktete Angusspunkte mittels Nadelverschlussdüsen gefüllt. Nach dem Spritzgussprozess werden zwei Metalleinleger über ein Nietverfahren am KUM montiert. An der Innenseite dieser Einleger befinden sich im oberen Bereich Sensoren zur Detektierung des Frontcrashs (Abb. 31). Um ein aussagekräftiges Sensorsignal im Crashfall zu erhalten, ist das mechanische Bauteilverhalten in diesem Bereich essenziell. Die nachträglich montierten Blecheinleger dienen in diesem Bereich einer entsprechenden Bauteilversteifung.

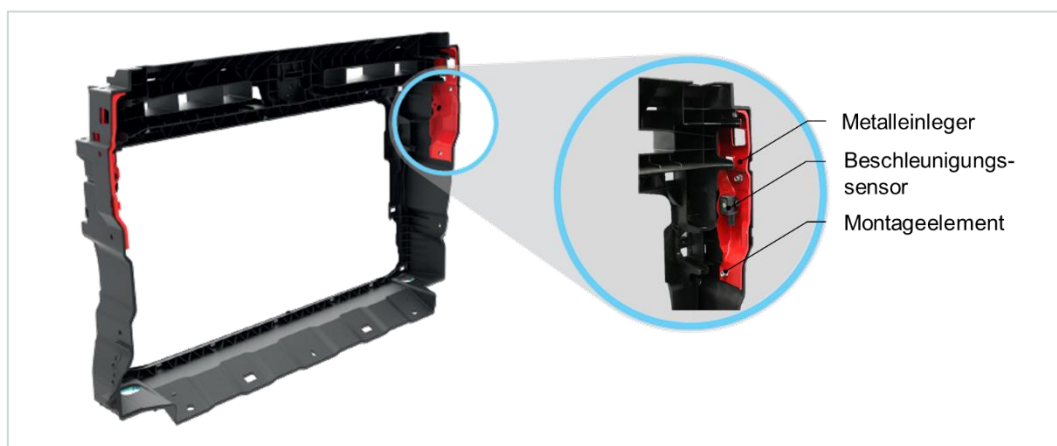


Abb. 31: KUM Tiguan mit Metalleinleger und Crashsensor [59]

Seit 2013 besteht der KUM des Golf VII, Passat und Sharan (2015) aus hochverstärktem Polyamid 6 mit 40 wt.% Faseranteil. Damit werden neben der Reduktion von Gewicht neue gestalterische Freiheiten ermöglicht. Der Einsatz von Polyamid 6 (PA 6) ist allerdings nachteilig im Hinblick auf Rohstoffkosten, Materialvortrocknung und Verarbeitung zu betrachten. Mit einem Rohstoffpreis für PA 6 von etwa 1,78 €/kg im Vergleich zu PP mit 0,78 €/kg (Stand: April 2017 [60]) betragen die Materialkosten des Kunststoffs mehr als das doppelte. Ebenfalls gestalten sich die Verarbeitungsbedingungen auf Grund der hygroskopischen Eigenschaft des PA 6 sowie der

geringen Standzeit in der Schnecke der Spritzgussmaschine als komplex. Für den Montageträger gelten nach der internen Norm TL 52625 für die mechanischen Kennwerte des Kunststoffmaterials spezielle Anforderungen, die eingehalten werden müssen (vgl. Tab. 5).

Tab. 5: Anforderungen an mechanische Kennwerte für KUM nach TL52625

Kenngröße	Wert
Biegefestigkeit (bei 23°C)	$\geq 45 \text{ MPa}$
Biege-E-Modul	$\geq 2000 \text{ MPa}$
Schlagzähigkeit	$\geq 30 \text{ kJ/m}^2$
Zugfestigkeit	Keine Angabe
Durchstoßfestigkeit	Keine Angabe

3.2 Bauteilverhalten im Crash

Mit etwa 60 % ist die Frontalkollision der am häufigsten auftretende Crashfall. Etwa 75 % aller Frontalkollisionen ereignen sich unterhalb einer Geschwindigkeit von 15 km/h. Nach dem europäischen Crashprogramm Euro NCAP wird in drei Fälle mit unterschiedlichen Überdeckungsweiten (100 %, 40 %, 25 % Überdeckung) unterteilt. Die Bezeichnung ODB (Offset Deformable Barrier) in Bezug auf die Überdeckungsweite, kennzeichnet dabei die teilweise Überdeckung der Barriere mit dem Fahrzeug. Der ODB-Crash mit 40%-iger Überdeckung wird als Standardcrash angesehen und demzufolge auch als Basis für weitere Erläuterungen und Versuche verwendet [61].

Die in Kapitel 3.1 erwähnten Sensoren werden für den amerikanischen Markt jeweils links und rechts hinter dem Metalleinleger verbaut. Für den Rest der Welt kommt ein Sensor in der Mitte des Obergurts hinter dem Haubenschloss zum Einsatz. Bei einem Frontalaufprall des Fahrzeugs registrieren diese Sensoren die Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit und vergleichen diese mit dem Abbremsverhalten der übrigen im Fahrzeug verbauten Sensorik. Wird ein Schwellenwert für eine bestimmte Zeit überschritten und weisen auch andere Signalgeber hohe Beschleunigungswerte auf, leiten die Steuergeräte auf Grund der Plausibilität der Ergebnisse das Auslösen der aktiven Rückhaltesysteme ein. Abb. 32 gibt den zeitlichen Ablauf bei einem Frontalaufprall der beiden Insassenschutzsysteme Airbag und Sicherheitsgurt für den Fahrer wieder. Es ist zu erwähnen, dass sich nach dem gleichzeitigen Auslösen von Gurtstraffern und Airbags für beide Passagiere die Zeiten bis zum Erreichen des vollen Airbaginnendrucks unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass der potenzielle Aufschlagweg für den Fahrer kürzer ist, als für den Beifahrer. Für moderne Rückhaltesysteme spielen weitere Faktoren, wie die Sitzposition und auch das Gewicht der Insassen je Sitzplatz eine entscheidende Rolle, wann und wie stark die

Schutzsysteme arbeiten müssen [47] [62]. Bei einer Frontalkollision findet ab einer Geschwindigkeit zwischen 25 und 30 km/h gegen ein festes Hindernis eine Auslösung des Airbags statt. Zum Zeitpunkt „Null“ erfolgt der Fahrzeugaufprall. Innerhalb von 10-15 ms entscheidet die Sensorik, ob der Airbag ausgelöst wird oder nicht. Etwa 40-50 ms nach dem Aufprall hat sich der Airbag voll entfaltet und seine optimale Größe erreicht. Nach etwa 150 ms hat sich der Airbag bereits größtenteils wieder entleert [62].

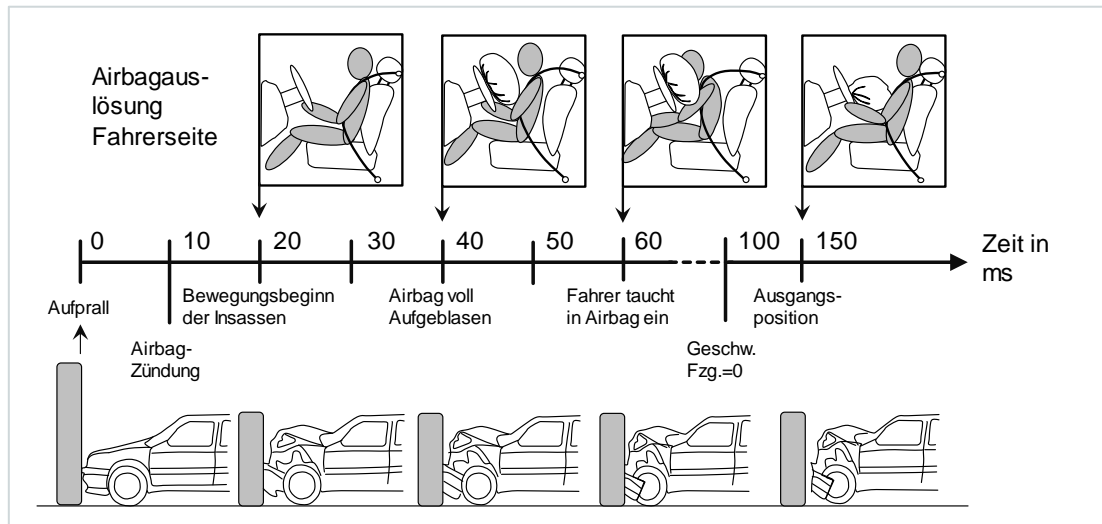


Abb. 32: Zeitschema der Airbagauslösung beim Frontcrash, modifiziert [63]

3.3 Metalleinleger als Versteifungselement der Versagenszone

Für die oben beschriebene Überschreitung des Schwellenwerts bei Frontalaufprall ist eine Beschleunigung der Sensoren in X-Richtung (entgegen der Fahrtrichtung) notwendig. Um die gezielte Richtung der Beschleunigung bei sprödem Versagen des PP-KUMs zu garantieren, werden die in Kapitel 3.1 beschriebenen Metalleinleger als Versteifungselemente verbaut. Die manuell montierten Einleger bestehen aus einem kaltgewalzten, niedriglegierten Stahl CR240LAGI60/60U. Er ist unbeschichtet und entspricht den Anforderungen für Nicht-Außenhautteile. Die Versagenszone, auf die die Barriere im ODB-Fall trifft, ist in Abb. 33 zu sehen. Bei einem Frontalaufprall hat die Barriere zuerst Kontakt mit dem Querträger. Sie faltet sich in Höhe des Querträgers auf und dringt mit der restlichen Energie tiefer in das Frontend ein. Aufgrund der Höhenlage von SUV-Fahrzeugen überlagert die Barriere zwar den Seitengurt, taucht aber unterhalb des versteifenden Obergurts ein. Der Obergurt bleibt in Position während die Barriere den Seitengurt abtrennt und wie einen Hebel nach unten drückt. Dieses Ausreißen kann die Signalübertragung des Sensors beeinflussen, weshalb für den *Tiguan* ein Versteifungselement in den KUM integriert wurde.

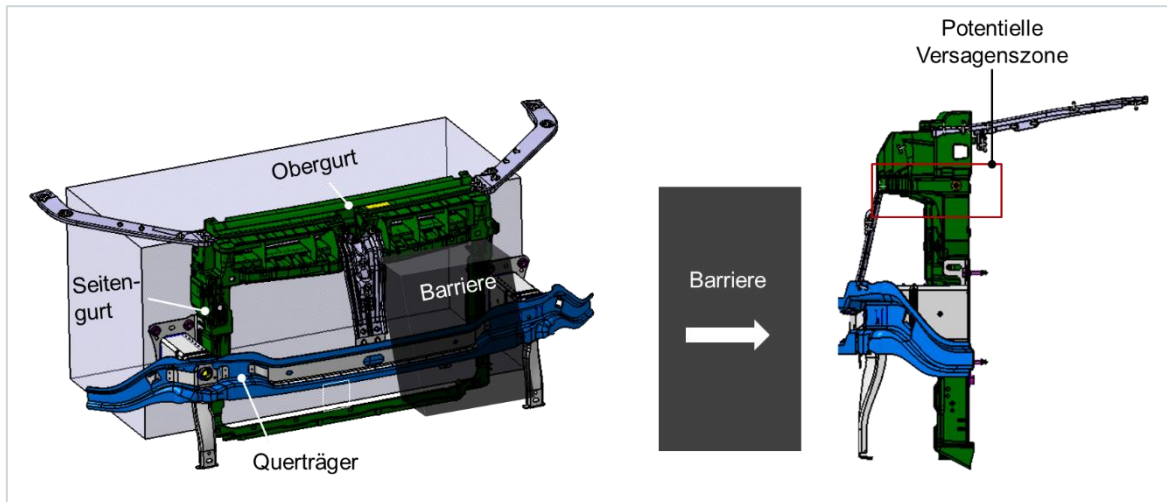


Abb. 33: Aufprallhöhe Barriere im ODB-Crash mit KUM-ZSB;
Isoansicht (links) und Seitenansicht mit potenzieller Versagenszone (rechts) [59]

Der Kunststoffmontageträger als vollständiges ZSB muss diverse Entwicklungsprüfbedingungen (EPs) sowie vorgeschriebene Crashprüfungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten bestehen, ohne die Insassen zu gefährden. Wie sich die Spannungen im Bereich des Crahsensors bei einer frontal eingeleiteten Kraft F verhalten, ist in Abb. 34 zu sehen. F beträgt hier 2750 N und trifft mit einer 40 %-igen Überdeckung, unterhalb des Obergurts auf das Bauteil. Die Anschraubpunkte sind als ‚fest‘ definiert.

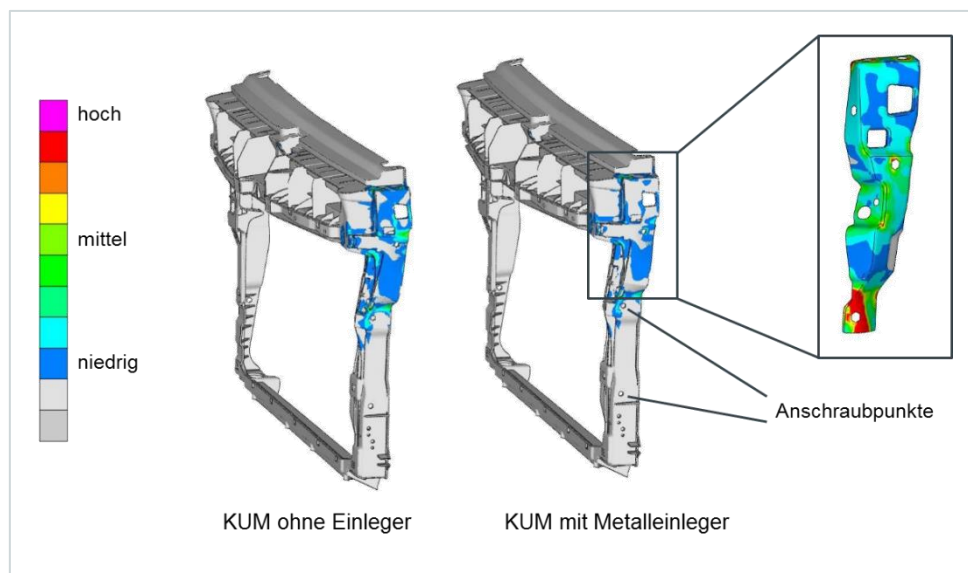


Abb. 34: Entstehende Spannungen im KUM (mit und ohne Einleger)
bei einer frontalen Belastung von 2750 N [59]

Es ist zu erkennen, dass die Spannungen im Kunststoff bei der Variante ohne Einleger flächig in der oberen Hälfte des Seitengurts ausgeprägt sind. Bei der Variante mit Metalleinleger wird ein Großteil der Kraft auf das Metall übertragen. Da keine stoffschlüssige Verbindung zwischen

Metallverstärkung und KUM besteht, sind die Schraubpunkte und Nietverbindungen besonders belastet. Der Bereich mit der höchsten Spannung befindet sich am unteren Anschraubpunkt des Metalleinlegers, welcher gleichzeitig der obere Anschraubpunkt des Querträgers ist. Da dieser Punkt als ‚fest‘ definiert ist, treten bei der Krafteinleitung hohe Zug und Torsionskräfte aus, die sich als hohe Spannung in der Simulation widerspiegeln. Demnach muss die Verstärkung einen Bereich vom oberen Ende des Seitengurts bis über den oberen Anschraubpunkt des Querträgers umfassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Faserverbundmaterial in Bezug auf minimalen Fasereinsatz, Handhabung und Verarbeitung sowie Kosten zu entwickeln und für den beispielhaften Einsatz innerhalb eines Kunststoffmontageträgers ausreichend zu qualifizieren. Dabei muss der gitterartige FVK-Einleger den Bedingungen im Crash sowie weiterer vielfältiger Freigabeanforderungen nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten genügen. Darauf basierend erfolgt die Auswahl der potenziellen Verstärkungsfasern, wie sie in Kapitel 4.1.1 aufgelistet sind. Diese müssen für das Beispielbauteil KUM in Kombination mit der Spritzgussmasse die Bedingungen der TL erfüllen. Ebenso ist die Haftung der Komponenten untereinander essenziell. In Abb. 35 sind die Bereiche schematisch dargestellt, die für die Entwicklung einer Verstärkungsalternative als Gittergewebe maßgeblich sind.



Abb. 35: Schema der Entwicklungsbereiche des Gittergewebes

Die Faser, welche die besten mechanischen Eigenschaften und das beste Verbundverhalten zeigt, wird zu einem Gittergewebe verarbeitet. Die Struktur des Gewebes wird gitterartig aufgebaut, um ein Umfließen der Fasern und eine optimale Einbettung zu generieren. Der Gitterabstand

wird in Abhängigkeit der Faserfüllung der Spritzgussmasse gewählt. Gleichzeitig bedingt die offene Gitterstruktur eine erweiterte Flexibilität des Einlegers. Die Performance des Gittergewebes wird im ersten Schritt in einer einfachen Plattengeometrie überprüft. Dabei müssen reproduzierbare Verarbeitbarkeit, Erhöhung der mechanischen Eigenschaften im Verbund sowie ein gutes Handling gewährleistet sein, um in eine konturierte Verarbeitung zu gehen. Die Grenzen der Verformung werden über Modelldrapierungen definiert und bilden somit die Grenzkonturen für das Beispielbauteil KUM. Durch die Anpassungen der KUM-Kontur kann der Einleger als geometrisch einfach zu integrierende Verstärkung ausgeführt werden. Dies ist essenziell für eine spätere automatisierte Verarbeitung. Durch den Verbundaufbau kann die auftretende Kraft bei Belastung von der SG-Matrix auf die gesamte Struktur des Gitters übertragen und Spannungsspitzen bspw. an Schraub- und Nietverbindungen vermieden werden. Es ist das Ziel, mit einem zielgerichteten minimalen Fasereinsatz einen maximalen Verstärkungserfolg zu erzielen und in dem Anwendungsbeispiel KUM die Metalleinleger inklusive manueller Montage zu substituieren.

3.4 Verhalten von faserverstärkten Kunststoffen im Crash

Der Einsatz von FVK bietet ein großes Potential für crashrelevante Bauteile. DYCKHOFF ET AL. zeigt in Untersuchungen, dass FVK-Crashelemente gegenüber serienmäßig eingesetzten Aluminiumabsorbern eine 10 % höhere Energieabsorption bei etwa 40 % Gewichtseinsparung ermöglichen [64]. Das höhere Energieabsorptionsvermögen von Faserverbundkunststoffen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen ergibt sich aus dem grundlegend verschiedenen Materialversagen. Bei FVK tritt eine progressive Schädigung entlang der Crashfront ein. Es ist ein kontinuierlich konstant hoher Kraft-Weg-Verlauf zu beobachten. Metallische Absorber hingegen zeigen einen oszillierenden Verlauf aufgrund von typischen Beul- und Faltvorgängen [65]. Die Crashenergie wird dabei durch ein Plastifizieren (Fließen) des Werkstoffes aufgenommen. Im Vergleich dazu findet bei FVK eine Vielzahl von mikro- und makromechanischen Bruchvorgängen statt. Dazu zählen Faser-Matrix Bruch, Ausknicken von Fasern, Delaminationen, Matrixbruch sowie Versagen der Faser-Matrix Haftung. Abb. 36 zeigt beispielhaft Kraft-Deformationskurven von einer FVK-Segmentprobe (Kreisrohrsegment mit angeschlossenen Versteifungsradien) und einem Stahlelement (quadratisches Rohr) während des Stauchungsvorgangs. Es sind jeweils der experimentelle und der simulierte Kurvenverlauf abgebildet. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass das FVK-Segment bei einem ähnlichen Kraft-Deformationsverlauf einen erhöhten Gewichtsvorteil aufweist.

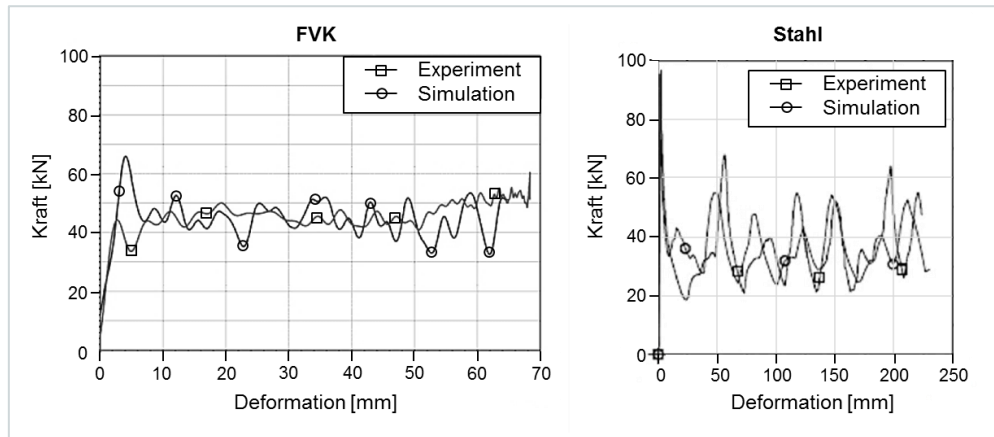


Abb. 36: Kraft-Deformationskurve eines FVK-Elements (links) [66] und eines Stahlelements (rechts) [67]

Abb. 37 zeigt exemplarisch die typischen Bruchmechanismen von Faserverbundkunststoffen anhand einer ILS-Prüfung. Der Abschnitt oben links (a) zeigt eine Probe mit interlaminarem Versagen. In dem Kraft-Weg Diagramm ist ein linearer Kraftanstieg zu sehen, der in einem Kraftpeak endet und bei Versagen einen sofortigen Kraftabfall zur Folge hat. Die Durchbiegung ist dabei sehr gering. Dieses Verhalten stellt eine hohe interlaminare Bindung dar und kennzeichnet eine optimale Kraftübertragung und somit einen gewünschten Versagensfall. Die Abschnitte b, c, d zeigen alternierende Versagensarten von endlosfaserverstärkten Kunststoffen. Der Abschnitt b steht beispielhaft für einen Bruch in der Druckzone durch interlaminare Rissbildung und Faltung. Diese Versagensart steht für eine schlechte Faser-Matrix Haftung sowie eine geringe Steifigkeit der Matrix und zeigt sich in einem Ausbeulen der Faserlagen. Der Kraftanstieg erfolgt langsamer, als in Abschnitt a und zeigt eine höhere Durchbiegung bei Erreichen des Kraftmaximums. In dem Abschnitt c zeigt sich ein Kraft-Weg Diagramm mit einem ähnlichen linearen Kraftanstieg, wie in Abschnitt a. Die Kraft pendelt sich auf einem Plateauwert ein, während die Durchbiegung weiter steigt. Dieser Verlauf kennzeichnet einen Schubbruch durch intra- und interlaminare Scherung, indem die einzelnen Faserlagen sich gegeneinander/ineinander verschieben. Der letzte Abschnitt (d) zeigt einen Mischbruch mit einem divergierenden Kraft-Weg Verlauf. Die Beanspruchungen überlagern sich, sodass interlaminare Scherung und sprödes Versagen in der Zugzone parallel erfolgen.

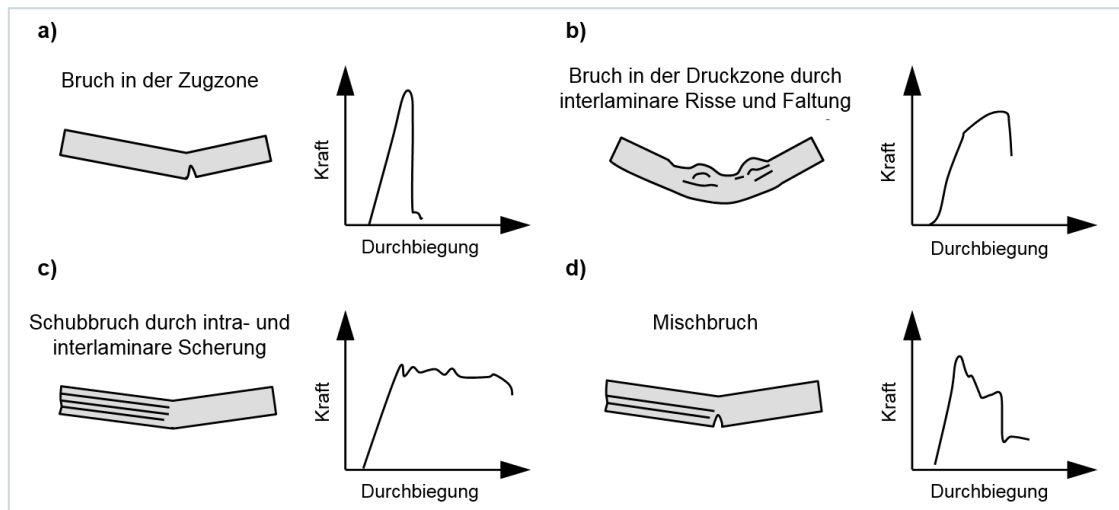


Abb. 37: Versagensarten von Faser-Kunststoff-Verbunden, modifiziert [61]

Im Crashfall findet meist eine Überlagerung der verschiedenen Fälle (Abschnitt d) statt. Dabei können die Stärke und die Anteile der Versagensarten bei gleichem Bauteil und gleicher Belastung variieren. Im Allgemeinen sind faserverstärkte Thermoplaste im Vergleich zu Duromeren bei Crashanwendungen besonders vorteilhaft. Sie weisen eine erhöhte Bruchdehnung und Bruchzähigkeit auf, haben ein besseres Dämpfungsverhalten und zeigen eine höhere Energieaufnahme vor der Rissinitiierung. Diese Eigenschaften erschweren die Rissausbreitung im Bauteil und erhöhen die Energieaufnahme im Vergleich zu Duromeren [61] [65].

4 Materialauswahlkonzept und Methoden

Dieses Kapitel erläutert die Systematik in der Werkstoff-/Verstärkungsauswahl, die prinzipiell auf unterschiedliche Bauteile übertragbar ist und ein generelles Vorgehen darstellt. Dabei kann anhand der Systematik, in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und Belastungsart, eine entsprechende Verstärkungsfasern und eine Gitterkonfiguration abgeleitet werden. Neben der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften liegt der Fokus auf der Faser-Matrix Interaktion und der Performance unter dynamischer Belastung.

4.1 Material

Das eingesetzte Matrixmaterial ist aktuell Bestandteil der Serienfertigung und wird bereits im Fahrzeug verbaut. Die Materialien der Textile und Textilverstärkungen sind kommerzialisierte Fasern, die für einen eventuellen Einsatz in der Serie mengenmäßig verfügbar sind. Die Auswahl der Faserarten basiert in dem Beispiel des Kunststoffmontageträgers auf dem Lastenheft und den damit zusammenhängenden vorgegebenen mechanischen Eigenschaften der technischen Entwicklung. In Anbetracht des Leichtbaupotentials spielt die Dichte der Verstärkungsfasern eine primäre Rolle bei der Materialauswahl. Weitere Aspekte liegen in der Verarbeitbarkeit und in dem Preis/Leistungsverhältnis, welche gemeinsam mit dem Textilhersteller *Delcotex* und dem *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden* untersucht werden.

4.1.1 Verstärkungsfasern

Die Verstärkungsfasern werden von unterschiedlichen Lieferanten bezogen. Sie dienen in erster Linie der Materialelektion, auf Basis dessen eine Faser für die Gitterverstärkung gewählt wird. Ebenso unterstützt sie die Auswahl für die spätere Verstärkungsstruktur, die optional im TFP aufgebracht wird.

➤ Naturfaser

Jute

Die untersuchte Jutefaser liegt in einem verdrehten Garn vor und wird von der Firma *Leco* bezogen. Sie verfügt über keinerlei Beschichtung [68]. Weitere Informationen sind in Tab. 6 aufgeführt.

➤ Glasfaser

Cem-FIL

Bei der verwendeten AR-Glasfaser handelt es sich um eine *Cem-Fil* Faser des Unternehmens *Owens Corning*. Sie ist chemisch und gegen UV-Strahlung beständig und weist eine epoxyfreundliche Schlichte auf [69]. Detaillierte Kennwerte sind der Tab. 6 zu entnehmen.

StarRov 490

Die zweite Glasfaser ist ein E-Glas der Firma *Johns Manville* und wird unter dem Namen *StarRov* kommerziell vertrieben. Sie ist für Anwendungen in der Automobilindustrie (vornehmlich LFT) besonders geeignet und verfügt über eine PP-freundliche Schlichte [70]. Eine genauere Beschreibung der Kennwerte zeigt Tab. 6.

➤ Kohlenstofffaser

Sigrafil –C T50

SGL stellt unter dem Namen *Sigrafil* eine Carbonfaser mit thermoplastkompatibler Schlichte her. Die Biegefestigkeit im Verbund mit PA steigert sich laut Datenblatt gegenüber Standardschlichten um das doppelte [71]. Weitere Informationen sind in Tab. 6 aufgeführt.

Toho Tenax-E HTA 40 E13, 6K

Die Faser *Tenax-E HTA 40* ist eine Carbonfaser der Firma *Toho Tenax*. Sie besitzt eine epoxidfreundliche Schlichte und verfügt über besonders ausgeglichene Lamineigenschaften unter Zugbeanspruchungen [72]. Detaillierte Kennwerte sind der Tab. 6 zu entnehmen.

Tab. 6: Kennwerte untersuchter Verstärkungsfasern [68] [69] [70] [71] [72]

	Jute	Glas 1	Glas 2	Carbon 1	Carbon 2
Bezeichnung	-	Cem-Fil 5325	StarRov 490	Sigrafil-C T50	HTA40 E13, 6K
Garn-/Rovingstärke [Tex]	280	640	600	406	400
Faserdurchmesser [µm]	~ 55	~ 12	~ 15	~ 7	~ 7
Dichte [g/cm³]	1,44	2,68	2,60	1,80	1,76
Beschichtung	-	Epoxy	PP	Thermoplast (vzgl. PA)	Epoxy
Zugfestigkeit [MPa]	-	1000 - 1700	2500 - 3000	4000	3950
E-Modul [GPa]	-	72	75	240	238
Preis	→	↓	↓	↑	↑

Die vorige Tabelle gibt einen Überblick über die Eigenschaften und den Aufbau der Fasern. Neben den abweichenden Rovingstärken fallen die unterschiedlichen Faserdurchmesser auf. Die Kohlenstofffasern besitzen den geringsten Durchmesser (~ 7 µm), während die Glasfasern über

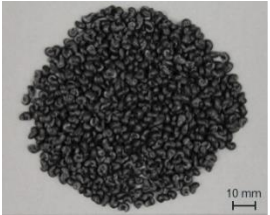
einen ca. doppelt so hohen Durchmesser verfügen (~12-15 μm). Der Durchmesser des Jutegarns liegt mit ~ 55 μm am höchsten, weist aber mit einer Dichte von 1,44 g/cm^3 die geringste Dichte auf. Die Dichte der Carbonfasern liegt mit knapp ~ 1,8 g/cm^3 unwesentlich höher. Die Glasfasern weisen Dichten von 2,6 und 2,68 g/cm^3 auf. Die Schichten der Glas- und Kohlenstofffasern unterscheiden sich in der Kompatibilität zu Thermo- bzw. Duroplasten. Die Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften sind ebenfalls signifikant. Sowohl die Zugfestigkeit als auch der E-Modul der Kohlenstofffasern sind um ein Drei- bis Vierfaches höher als die Kennwerte des StarRov 490 (Glas 2). Bezogen auf die Cem-Fil Glasfaser übersteigen die Zugeigenschaften der C-Fasern die der Cem-Fil Fasern ebenfalls um das Vierfache. Der Preis für die Glasfasern ist im Vergleich mit den Kohlenstofffasern als gering zu bewerten. Die Naturfaser befindet sich im mittleren Preissegment.

4.1.2 Matrix

Als Matrixmaterial für die 1D-Platten sowie die Bauteilmusterungen dient ein zu 30 % mit Kurzglasfasern gefülltes Polypropylen der Firma *Lyondell Basell*. Es handelt sich hierbei um das Serienmaterial für das Bauteil KUM *Tiguan*. Das PP ist ein Homopolymer mit guter Dimensionsstabilität sowie erhöhter Steifigkeit. Die Kennwerte des Serienmaterials zeigt Tab. 7. Da *Lyondell Basell* kein Serienmaterial ohne Kurzglasfaseranteil zur Verfügung stellen kann, wird zur Ermittlung der Grenzflächenscherfestigkeit und der Kennwerte im UD-Verbund auf ein Polypropylen (*PP HG 475FB*) der Firma *Borealis* zurückgegriffen. Hiermit soll eine mögliche Beeinflussung der Faser-Matrix Interaktion durch Kurzglasfaserverstärkungen ausgeschlossen werden. Zusätzlich wird der Einfluss der unterschiedlichen Faserschichten auf das Auszugsverhalten untersucht. Das *PP HG 475FB* ist ein fließfähiges Homopolymer (27 g/10 min) mit besonderer Eignung für Faserverbundapplikationen, welches versponnen und mit den Verstärkungsfasern zu einem Hybridgarn verarbeitet wird. Entsprechend dem Serienmaterial des Bauteils KUM, ist für eine mögliche Haftungsverbesserung 2 % *Exxelor P1020* der Firma *ExxonMobil* beigelegt.

Die Auswahl des Materials *PP HG 475FB* lässt in Bezug auf die Faser-Matrix Interaktion im Single-Fibre Pull-Out lediglich einen A-B Vergleich zu dem Basispolypropylen der Serienapplikation zu. Für die Beurteilung der Interaktion zwischen Faserbündel und SG-Matrix dient der Faserbündelauszugsversuch. Aus diesem Versuch kann das spätere Interaktionsverhalten im Bauteil abgeleitet werden.

Tab. 7: Materialkennwerte PP-GF30 [73]

Eigenschaften	Prüfnormen	Einheit	Wert	 PP-GF30
Dichte	ISO 1186	[g/cm ³]	1,14	
Zugfestigkeit	ISO 527-1, -2	[MPa]	100	
Zugmodul	ISO 527-1, -2	[MPa]	7000	
Bruchdehnung	ISO 527-1, -3	[%]	3,0	
Schlagzähigkeit	ISO 179	[kJ/m ²]	50	

4.2 Methoden

Abb. 38 zeigt die Auswertungssystematik der angewandten Methoden sowie deren Wechselwirkungen untereinander. Der Systematik übergeordnet steht die Zielstellung der Arbeit, die Metall-einleger im Bereich der Crashesensoren durch strukturierte Faserverstärkungen zu substituieren. Allgemein ist die Auswertung in drei Ebenen aufgeteilt. Die erste Ebene charakterisiert die Eigenschaften der Rohmaterialien (Faser, Matrix). Ebene zwei befasst sich mit dem textilen Einleger und der Interaktion mit der Matrix. Ebene drei betrachtet das Herstellungsverfahren sowie die Verbundeigenschaften in der Platten- und Bauteilgeometrie. Die Betrachtung erfolgt sowohl aus Sicht des Prozesses als auch aus Sicht des Materialverbunds.

➤ Erste Ebene

In der ersten Untersuchungsebene liegt der Fokus auf der Charakterisierung und Einordnung der Faser- und der Matrixeigenschaften. Es werden die mechanischen Eigenschaften sowie die Oberflächenbeschaffenheit und die Geometrie der Fasern bestimmt. Die Matrixcharakterisierung erfolgt unter mechanischen und physikalischen Gesichtspunkten und legt die Basiskennwerte für die Auslegung des Kunststoffmontageträgers fest. Zusätzlich zeigen die Untersuchungen Besonderheiten der Matrix auf, die bei dem Anspritzen von Textilien bedacht werden müssen. Die Erkenntnisse über die potenziellen Verstärkungsfasern und die Matrix dienen als erstes Eingrenzungskriterium für die Materialauswahl und bilden die Grundlage der zweiten Untersuchungsebene. Hier werden die auftretenden Wechselwirkungen innerhalb der Faser-Matrix Interaktion betrachtet. Dazu zählen eine Variation der Schlichte, um den Einfluss auf die Verbundhaftung zwischen Faser und Matrix zu überprüfen sowie eine Untersuchung der Faserimprägnierung/-durchdringung mit Matrix. Um die Performance der Verstärkungsfasern in einem unidirektional ausgerichteten Verbund mit einem kommerziell üblichen Faservolumengehalt (~50 vol.%) zu beurteilen, erfolgt eine Herstellung UD-verstärkter Platten über einen Wickelkern. Die Untersuchungen an dem UD-Verbund beschränken sich auf Quer- und Längszugfestigkeit sowie Schlagzähigkeit und einem speziellen Compression Shear Test.

➤ **Zweite Ebene**

Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte und der eruierten Kennwerte wird in der zweiten Untersuchungsebene eine Faser als Basismaterial für die Herstellung der strukturierten Faserverstärkungen ausgewählt. Die Struktur und Form der Gittereinleger resultiert aus dem Ansatz eine Faserverstärkung zu generieren, die im Spritzgussverfahren mit dem Matrixmaterial durchströmt und in die Matrix eingebettet wird. So kann das Faserpotential optimal ausgenutzt werden, indem die SG-Matrix die eingeleitete Kraft direkt in die Fasern überträgt. Die Gitterabstände orientieren sich in diesem Beispiel an der maximal auftretenden Länge der Kurzglasfaserverstärkung im SG-Material, sodass eine Durchströmung sichergestellt werden kann. Die Herstellung erfolgt in Form von Gittergeweben mit unterschiedlichen Gitterabständen. Die Herstellvariante des Webens wird für den potenziellen Einsatz in der Großserie gewählt, da hierdurch eine schnelle und somit wirtschaftliche Produktion der Einleger abbildbar ist. Die Bindungsart wird variiert, um die Drapierfähigkeit sowie die Verschiebefestigkeit auf die Bauteilgeometrie anzupassen. Die Einleger werden hierzu Prüfungen auf Verformbarkeit, Scher- und Verschiebefestigkeit sowie Zugfestigkeit unterzogen. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Faser-Matrix Interaktion sowie auf das spätere Verhalten und die Verarbeitung im Spritzgussprozess zu. Um das Potential einer zusätzlich aufgebrachten Verstärkung zu untersuchen, werden einige Gittergewebe in einem Stichversuch über den TFP-Prozess mit Carbonfasern bestickt. Die Abstände und Ausrichtungen der Stickerei variieren zwischen den einzelnen Geweben. Die Eigenschaftscharakterisierung erfolgt analog zu der dritten Untersuchungsebene.

➤ **Dritte Ebene**

In der dritten Untersuchungsebene wird die Verarbeitung im Spritzgussprozess näher beleuchtet. Ausgehend von dem Herstellungsverfahren, werden in einem Kreuzversuch auf Basis der Einstellungen Schmelzetemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Werkzeugtemperatur die Verarbeitungsparameter ermittelt. Diese werden unter Berücksichtigung von Serienanforderungen auf die Parameter der Bauteilherstellung übertragen. Um den Einfluss verschiedener Angussarten zu beurteilen, wird innerhalb der eindimensionalen Plattengeometrie zwischen Punkt- und Filmanguss variiert und die mechanischen Kennwerte untersucht. Zusätzlich wird die Anbindung der Gittereinleger an die Spritzgusschmelze mit Hilfe von Schliffbildern überprüft. CT-Aufnahmen zeigen die eingebetteten Teile der Einleger und geben Anhaltspunkte für die Unversehrtheit nach der Verarbeitung. Die Charakterisierung der Platten dient dazu, Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad der Verstärkung im Verbund zu ziehen. Darunter fallen die Faser-Matrix Interaktion sowie das Verarbeitungsverhalten der Gittereinleger im Spritzgussprozess. Diese Erkenntnisse werden auf die Musterung des Kunststoffmontageträgers übertragen. Für die Bauteilmusterung wird die

Geometrie der Gittereinleger auf den Versagensbereich des KUM adaptiert. Hier müssen neben der Maßhaltigkeit (Verbaufähigkeit) auch die internen Entwicklungsprüfbedingungen erfüllt werden. Ein Nachweis der Crashtaughlichkeit ist ebenfalls zu erbringen. Weiterhin wird die Automatisierbarkeit für eine mögliche Umsetzung in der Serie überprüft. Diese abschließenden Untersuchungen lassen eine erste Bewertung für eine mögliche Substitution der Metalleinleger im Bereich der Crashsensoren durch strukturierte Faserverstärkungen zu und ermöglichen weitere Handlungsempfehlungen.

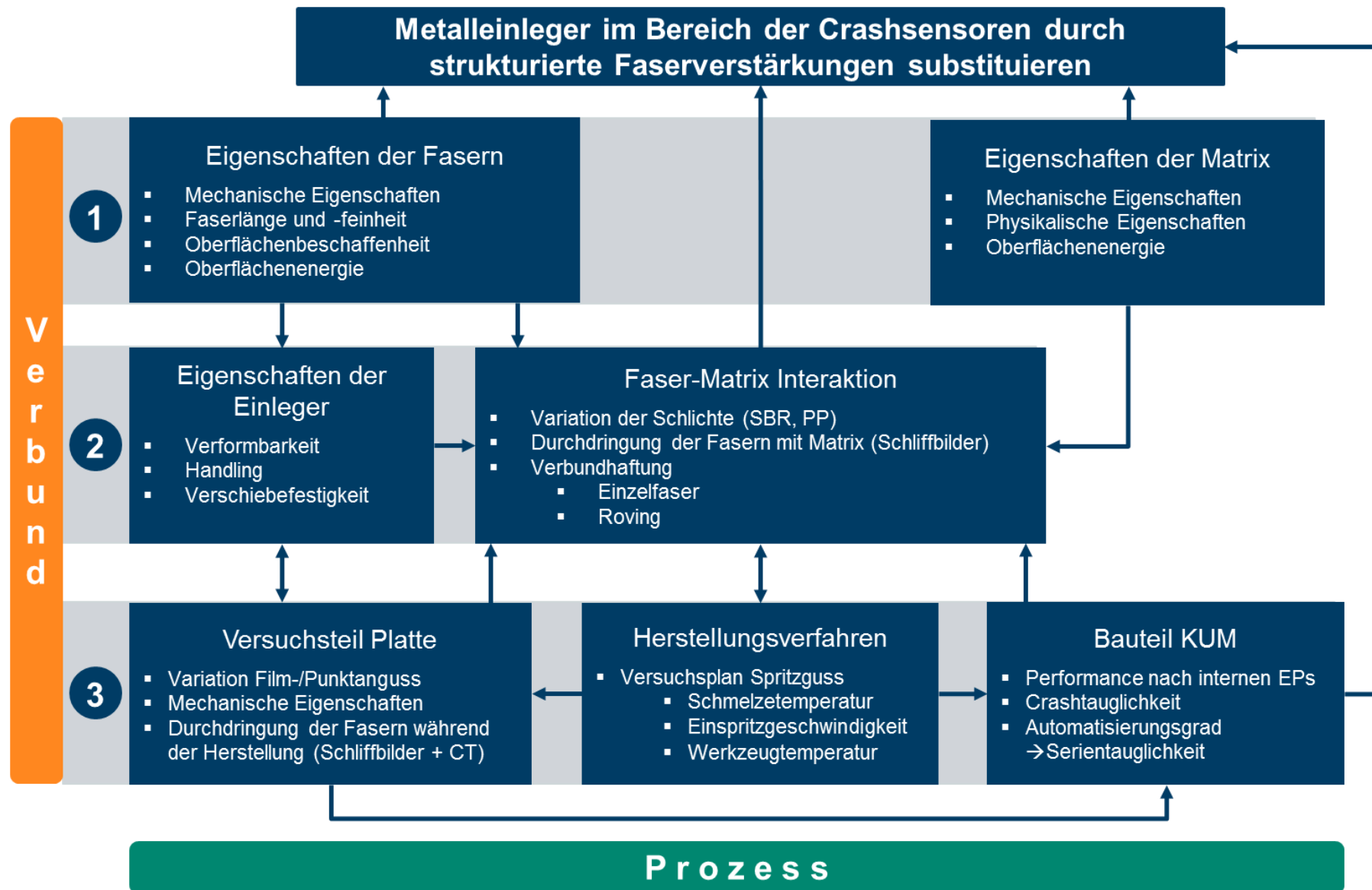


Abb. 38: Schema der Wechselwirkungsbereiche mit übergeordneten Verknüpfungen

4.2.1 Charakterisierung der Verstärkungsfasern

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Charakterisierung der eingesetzten Fasern beschrieben. Die Untersuchungen beziehen sich sowohl auf die Topographie, als auch auf die mechanischen Eigenschaften und die Interaktion zwischen Faser und Matrix. Die Überprüfung des Feuchte- und Schlichtegehalts sowie der Faserdurchmesser und -geometrie charakterisiert den Lieferzustand der Fasern und bildet die Diskussionsgrundlage für die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen. Mit Hilfe von REM-Aufnahmen sollen Oberflächenbesonderheiten und Veränderungen vor und nach den Haftungsversuchen (Single-Fibre Pull-Out) aufgezeigt werden, um Rückschlüsse auf die Faser-Matrix Interaktion zu ziehen. Unterstützend dienen Kontaktwinkelmessungen, welche die Affinität zu einer polaren Messflüssigkeit aufzeigen. Der Einzelfaserzugversuch bildet den Ausgangspunkt für die Bewertung des mechanischen Potentials der Fasern. Die Charakterisierung im UD-Verbund unter Zug-, Schlag- und Scherbeanspruchung gibt zuletzt einen Hinweis auf die Performance und Interaktion im Verbund bei einem konventionellen Faservolumengehalt von 50 vol.%. Diese Untersuchungen zeigen die maximal zu erreichenden Kennwerte bei unidirektionaler Faserausrichtung und optimaler Lasteinleitung entlang der Fasern.

Einzelfaserdurchmesser/Fasergeometrie

Die Ermittlung des mittleren Einzelfaserdurchmessers D_f erfolgt über optische Mikroskopie. Im Mittel werden die Durchmesser von >200 Einzelfasern vermessen und der daraus resultierende durchschnittliche Einzelfaserdurchmesser errechnet. Für kreisrunde Flächen steht die Dreipunktmessung zur Verfügung; andersförmige Fasern bedienen sich der Flächenbestimmung für polygone Geometrien [74].

Topographie mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Mit Hilfe von rasterelektronischer Mikroskopie werden die Faseroberflächen auf die Homogenität der Schlichteverteilung sowie auf Anhäufungen und Fehlstellen untersucht. Ebenfalls erfolgt eine nähere Betrachtung der Auszugsflächen beim Single-Fibre Pull-Out, um Rückschlüsse auf die Faser-Matrix Interaktion zu ziehen. Für die Untersuchungen kommt das *FE-SEM Ultra 55* der Fa. *Carl Zeiss SMT AG* zum Einsatz [74].

Bestimmung des Schlichte- und Feuchtigkeitsgehalts (Pyrolyse und TGA)

Die gravimetrische Bestimmung des Schlichtegehalts der Fasern erfolgt über Pyrolyse. Der Versuch wird in Anlehnung an die DIN ISO 1887 [75] bei 650°C für 1 h im Muffelofen durchgeführt. Der Feuchtegehalt wird nach DIN EN ISO 3344 [76] bei 80°C für 3 h in einem Umlufttrockenschrank mit einer Einwaage von 5 g Fasern geprüft. Ergänzend wird eine Thermogravimetrische Analyse (TGA) zur Beurteilung der Temperaturbeständigkeit von Schlichte und Faser vorgenommen. Die TGA ist eine thermische Analysemethode, bei der die Änderung der Masse (in %) einer Probe in Abhängigkeit von der Zeit bzw. von der Temperatur gemessen wird. Sie dient dazu, einzelne Bestandteile und deren Zersetzungstemperatur herauszufinden. Die zu messende Probe wird in einem Tiegel eingewogen und in der TGA platziert. Ein Thermoelement nahe des Tiegels misst die Temperatur in der Prüfkammer. Der Tiegel selbst besteht aus inertem Material wie Platin oder Aluminiumoxid, um eine Verfälschung der Messwerte durch eventuell auftretende Reaktionen auszuschließen. Die Prüfkammer beinhaltet einen Ofen, der mit konstanten Heizraten temperiert und mit unterschiedlichen Gasen (bspw. O₂, N₂) gespült werden kann. In Abb. 39 ist eine Thermowaage mit Prüfkammer und Probe abgebildet.

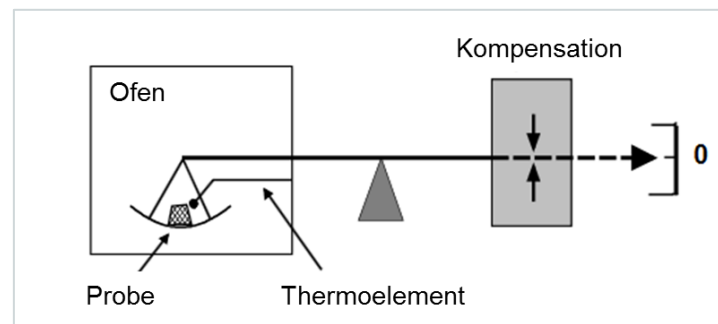


Abb. 39: Schematische Darstellung einer Thermowaage, modifiziert [77]

Die Auswertung erfolgt über das Auftragen der Masse gegen die Zeit bzw. gegen die Temperatur. Durch die erste Ableitung lässt sich die Kurve der Differentialthermogravimetrie bestimmen. Hiermit können Aussagen zu der Zersetzungstemperatur, Zersetzungsgeschwindigkeit, thermischen Stabilität sowie über den Anteil von flüchtigen Bestandteilen (Feuchtigkeit, Weichmacher) getroffen werden [39] [77]. Das verwendete Messgerät ist eine TGA Q5000 der Fa. TA Instruments [74]. Das Temperaturprogramm unter Stickstoffatmosphäre ist in Abb. 40 abgebildet.

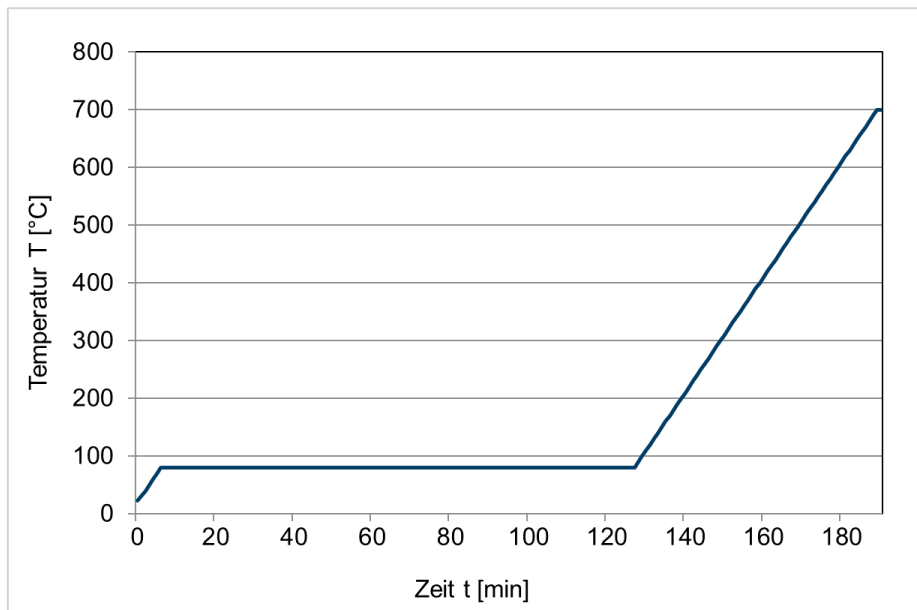


Abb. 40: TGA Aufheizkurve

Einzelfaserzugversuch (klimatisiert/vorgetrocknet)

Die Einzelfaserzugversuche erfolgen bei konstantem Raumklima von 23°C und 50 % relativer Luftfeuchte mit dem *Favigraph* (Fa. *Textechno*, *Herbert Stein GmbH & Co. KG*). Die Messung beginnt mit der Bestimmung des Faserdurchmessers mittels vibroskopischer Methode nach ASTM D 1577 [78]. Anschließend wird die Faser mittels Transferklemmen zu den Messklemmen befördert und die Messung gestartet. Die Einzelfaserzugversuche entsprechen der DIN EN ISO 5079 und werden für Glas- und Kohlefaser mit einer 100 cN Kraftmesszelle, einer Einspannlänge von 50 mm und einer Geschwindigkeit von 25 mm/min durchgeführt. Bei Jute werden abweichende Parameter von 1000 cN Kraftmessdose, 30 mm Einspannlänge, 15 mm/min Zuggeschwindigkeit verwendet. Jede Messreihe besteht aus 50 geprüften Einzelfasern. Um den Einfluss der Feuchtaufnahme zu beurteilen, werden die Fasern klimatisiert (120 min, 23°C, 50 % Luftfeuchtigkeit) und vorgetrocknet (120 min, 80°C) gemessen [74]. Für die Berechnung der Kennwerte der Einzelfaserzugversuche wird auf die Faserdichten aus Tab. 8 zurückgegriffen.

Tab. 8: Angewandte Faserdichten [74]

Faser	Dichte [g/cm ³]
Jute	1,44
Glas 1	2,68
Glas 2	2,60
Carbon 1	1,80
Carbon 2	1,76

Single-Fibre Pull-Out

Bei einem Single-Fibre Pull-Out Test wird eine eingebettete Faser aus einem Matrixtropfen ausgezogen. Die gemessene Zugkraft an den Grenzflächen gibt Auskunft über die Interaktion zwischen Matrix und Faser. Für die Herstellung der Einzelfaser-Modellverbunde werden jeweils einzelne Filamente temperatur- und zeitgesteuert in die Matrix eingebettet. Dabei lassen sich unterschiedliche Einbettlängen sowie Heizraten realisieren. Die exakte Positionierung der Faser wird durch ein Kamerasystem gewährleistet [74]. Detaillierte Einbettbedingungen zeigt Tab. 9.

Tab. 9: Herstellungsparameter für Einzelfasermodellverbunde [74]

Parameter	Angaben
Matrixmaterial	Polypropylen (PP HG 475FB + 2 % Exxelor P1020)
Temperatur/Zeit-Regime	Aufheizen auf 210°C, 210 s isotherm, Einbetten der Fasern, Abkühlung auf RT
Soll-Einbettlänge der Faser	150 µm (Jute) 800 µm (Glas 1, 2) 300 µm (Carbon 1, 2)

An den Kraft-Verschiebungskurven wird jeweils die Maximalkraft F_{max} und die Ist-Einbettlänge l_e bestimmt. Die scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit τ_{app} berechnet sich gemäß Gleichung 1, wobei D_f der Faserdurchmesser ist, der für jede Faser einzeln bestimmt wird.

$$\tau_{app} = \frac{F_{max}}{\pi D_f l_e}$$

Gleichung 1

F_{Max}	Maximalkraft	D_f	Faserdurchmesser
τ_{app}	Scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit	l_e	Einbettlänge

Im Gegensatz zu τ_{app} , welche die Anteile der Grenzflächenadhäsion, -reibung und thermische Spannungen zusammenfasst, ist die lokale Grenzflächenscherfestigkeit τ_d unbeeinflusst von der Grenzflächenreibung. In dem spannungsbasierten Modell ist die Debondingkraft F_d zu ermitteln, um τ_d zu berechnen. F_d und τ_d stehen in dem in Gleichung 2 und 3 angegebenen Zusammenhang. Für jede Faser-Matrix Kombination werden 15-20 Einzelmessungen getestet. Die Bruchflächen der ausgezogenen Fasern werden mittels REM-Untersuchungen analysiert. Zur Berechnung der mechanischen Kennwerte werden die in Tab. 10 angegebenen Parameter genutzt.

$$F_d = \frac{2\pi r_f \tau_d}{\beta} \tanh(\beta l_e)$$

Gleichung 2

$$\tau_d = \frac{F_d \beta}{2\pi r_f} \coth(\beta l_e) + \tau_T \tanh \frac{\beta l_e}{2}$$

Gleichung 3

F_d	Debondingkraft	r_f	Faserradius
τ_d	Lokale Grenzflächenscherfestigkeit	l_e	Einbettlänge
τ_T	Thermische Restspannung	β	shear-lag Parameter nach Nayfeh

Dabei werden β und τ_T durch folgende Gleichungen (Gleichung 4 und 5) beschrieben.

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{r_f^2 E_a E_m} \left[\frac{E_a V_f + E_m V_m}{\frac{V_m}{4G_a} + \frac{1}{2G_m} \left(\frac{1}{V_m} \ln \frac{1}{V_f} - 1 - \frac{V_f}{2} \right)} \right]}$$

Gleichung 4

$$\tau_T = \frac{\beta r_f E_a}{2} (\alpha_a - \alpha_m) \Delta T$$

Gleichung 5

Der shear-lag Parameter nach Nayfeh beinhaltet die Größen V_m , V_f , G_a und G_m , die sich wie in den Gleichungen 6 - 9 gezeigt, zusammensetzen.

$$V_m = 1 - V_f$$

Gleichung 6

$$V_f = \frac{r_f^2}{r_f^2 + l_e \left(\sqrt{R^2 - r_f^2} - \frac{l_e}{3} \right)}$$

Gleichung 7

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 + \nu_a)}$$

Gleichung 8

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$$

Gleichung 9

ΔT	$T_R - T_{Ref}$	G_a	Schermodul Faser (axial)
T_R	Vergleichsraumtemperatur	G_m	Schermodul Matrix

T_{Ref}	Referenztemperatur für spannungsfreien Zustand (SchmelztemperaturMatrix)	α_a	Thermischer Ausdehnungskoeffizient Faser (axial)
		α_m	Thermischer Ausdehnungskoeffizient Matrix
E_a	E-Modul Faser (axial)	V_m	Matrixvolumengehalt
E_m	E-Modul Matrix	V_f	Faservolumengehalt

Tab. 10: Parameter der Matrix und Verstärkungsfasern zur Berechnung der Kennwerte [79]

Matrix		PP			
E_m [MPa]	Youngs-Modulus	1400			
PV_m	Matrix Poisson-Ratio	0,35			
α_m [$10^{-6}/K$]	therm. Extension coefficient	150			
Tg_m [$^{\circ}C$]	Stress free Temperature	23			
Referenztemperatur [$^{\circ}C$]		23			
Faser		Glas 1, 2	Carbon 1	Carbon 2	Jute
E_a [MPa]	Axial-Youngs-Modulus	75.000	250.000	238.000	42.000
PV_a	Axial Fibre Poisson-Ratio	0,17	0,2	0,2	0,108
PV_t	Transversal Fibre Poisson-Ratio	0,17	0,2	0,2	0,014
α_a [$10^{-6}/K$]	Axial therm. Extension coefficient	5	-0,1	-0,1	77,2
α_t [$10^{-6}/K$]	Transversal therm. Extension coefficient	5	18	-0,1	-0,6

Kontaktwinkelmessung über Wilhelmy-Methode

Mit Hilfe der Wilhelmy-Methode lässt sich der Kontaktwinkel dünner Fasern mit bekanntem Umfang ermitteln. Die eingewogene Probe wird mit der Probenflüssigkeit in Kontakt gebracht und die Auszugskraft (F) des Filaments durch Eintauchen und Herausziehen ermittelt (Abb. 41). Die Prüfung endet mit Erreichen der Gewichtskonstanz. Die Kraft F definiert das Wilhelmy-Experiment als die Summe von Gravitations-, Grenzflächen-, Auftriebs- und hydrodynamischen Kräften (Scherkräften). Sie steht mit dem Umfang p der Faser vereinfacht wie folgt in Verbindung:

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \frac{F}{p}$$

Gleichung 10

γ_{LV}	Oberflächenspannung	F	Auszugskraft
θ	Kontaktwinkel	p	Umfang Faser

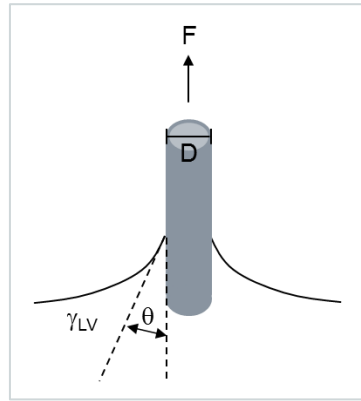


Abb. 41: Benetzungsschema einer Faser nach der Wilhelmy-Methode

Handelt es sich im Versuch um eine vollständig benetzende Kontaktflüssigkeit (Kontaktwinkel $\theta = 0^\circ$) mit bekannter Oberflächenspannung γ_{LV} , kann der Umfang p der Probe über Gleichung 10 bestimmt werden. Weitere Flüssigkeiten mit unbekanntem Kontaktwinkel θ werden durch das Messen der Kraft bezogen auf den Umfang p charakterisiert. Ist der Kontaktwinkel null und der Umfang bekannt, stehen die gemessene Kraft und die Oberflächenspannung γ_{LV} in direktem Zusammenhang [80].

Charakterisierung der Fasereigenschaften im UD-Verbund

Die Eigenschaften der Verstärkungsfasern im UD-Verbund lassen Rückschlüsse auf den maximal zu erreichenden Verstärkungsgrad zu. Bei einer einwandfreien Imprägnierung können die erreichten Eigenschaften mit einer Kennzahl von 100 % definiert werden.

Einstellung des Faservolumengehalts der UD-Platten

Die Einstellung des Faservolumengehalts (50 vol.%) erfordert auf Grund der unterschiedlichen Feinheiten der Verstärkungsfasern eine entsprechende Anzahl an PP-Filamentgarnen, die wie bereits erwähnt, aus dem Polypropylen von *Borealis* (PP HG 455FB) gesponnen werden. Die Berechnung der Matrixgarnanzahl erfolgt über die materialspezifische Dichte der Verstärkungsfasern und des PP-Garns. Die entsprechende Materialzusammenstellung ist in Tab. 11 dargestellt [74].

Tab. 11: Materialzusammenstellungen der Verstärkungsfasern und des PP-Filamentgarns

	Jute	Glas 1	Glas 2	Carbon 1	Carbon 2
Dicht Faser [g/cm³]	1,44	2,68	2,6	1,8	1,76
Dichte Matrix [g/cm³]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Gef. Faser-volumengehalt [%]	50	50	50	50	50

Anzahl Matrixgarne bei 60 tex	6	4	3,5	28	4
Garntiter gesamt [tex]	960	890	814	4950	650
Berechneter Faser-volumengehalt	49,7	49,4	49,8	49,3	46

Wickelaufbau und Pressen der Verbundplatten

Die Größe der unidirektional gewickelten Platten beträgt 250 x 250 mm und erfolgt über einen Wickelkern. Die entsprechende Apparatur wurde am *IPF Dresden* entwickelt und besteht aus den Einheiten Spulengatter, Roving-Führungseinheit mit Ablagekopf, montiert auf einer Wickelmaschine und dem dazugehörigen Wickelrahmen. In der Roving-Führungseinheit erfolgt eine partielle Spreizung des Verstärkungsrovings und die Zentrierung für eine gleichmäßige Zuführung zu der Ablageeinheit. Im nächsten Schritt wird die für das Wickeln notwendige Anzahl PP-Filamentgarne oberhalb und unterhalb des Verstärkungsrovings zugeführt (Side-by-Side-Ablage) [74]. Der Ablagekopf führt die PP-Filamentgarne und die Verstärkungsrovings zusammen und steuert die Ablagebreite und Polymerverteilung. Abschließend wird das zusammengeführte Fadenpaket mit 5-8 U/min und einem passenden Vorschub auf einen Wickelrahmen aufgewickelt. Die verwendeten Pressparameter für die Carbon- und Glasfasern beruhen auf Erfahrungswerten des *IPF* und werden wie in Tab. 12 zu sehen festgelegt. Die verwendete Jutefaser ist für eine Verarbeitungstemperatur von 250°C nicht geeignet, sodass mit Hilfe der TGA die geeignete maximale Verarbeitungstemperatur ermittelt wird [74]. Diese beträgt 200°C.

Tab. 12: Pressprogramm für UD-Platten, modifiziert [74]

	Jute			Glas 1, Glas 2, Carbon 1, Carbon 2		
	Temperatur [°C]	Druck [bar]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Druck [bar]	Zeit [min]
Aufheizen	200	12	-	250	12	-
Halten	200	12	28-35	250	12	21
Pressen	200	150	2	250	150	2
Kühlen	30	150	-	150	150	-
Kühlen	-	-	-	30	50	-

Zugfestigkeit

Die Zugprüfung der Quer- und Längsproben werden in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-5 mit Hilfe der Universalprüfmaschine 1456 der Firma *Zwick* durchgeführt. Die Kraftaufnehmer variieren je nach geprüftem Faserverbund zwischen 20 kN und 100 kN. Die Einspannlänge liegt bei 150 mm und der Probenumfang bei n = 5. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min (quer) und 2 mm/min (längs) mit einer angefahrenen Vorkraft von 2 N (quer) und 5 N (längs) [74].

Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeit wird über die ISO 179 mit Hilfe eines *PSd 50/15* der Firma *WPM* ermittelt. Das Arbeitsvermögen dieses Pendels beträgt 5 J. Das Pendel selbst verfügt bei der Prüfung über einen Reibungsverlust von 0,05 J mit einer Auftreffgeschwindigkeit von 3,8 m/s. Die Proben werden ausschließlich flatwise geprüft [74].

Compression Shear Test

Die Druckscherprüfung (engl. Compression Shear Test) wird nach einem patentierten Verfahren des *IPF Dresden* getestet. Dabei wird eine quaderförmige unidirektional verstärkte Probe zwischen zwei Stützlager (Abb. 42, 1 und 2) positioniert und über einen integrierten Schraubmechanismus befestigt. Das Lasteinleitungselement (3) leitet die Drucklast mittig in den Probekörper ein. Die Ausrichtung des Probekörpers ist so zu wählen, dass die Belastung bei UD-Platten entlang der Fasern stattfindet. Durch die einseitige Stütze unterhalb des Probekörpers entsteht neben dem Druck gleichzeitig eine Scherbeanspruchung. Nähere Erläuterungen zum Prüfaufbau sind SCHNEIDER ET AL. zu entnehmen [81]. Als Prüfapparatur dient die Universalprüfmaschine *TIRA-test 2300* der Firma *Zwick*. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min. Die Messung beginnt nach dem Erreichen der Vorkraft von 10 N. Die Kraft wird von einem 100 kN Kraftaufnehmer aufgezeichnet [74].

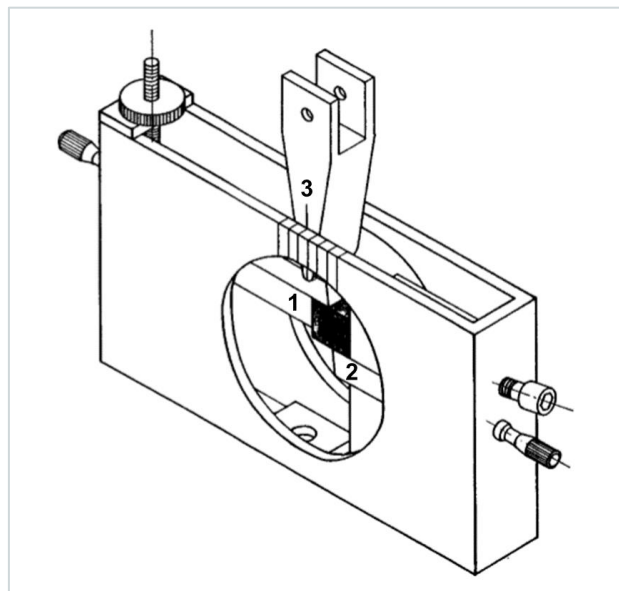


Abb. 42: Compression Shear Device (CSD), modifiziert [81]

4.2.2 Charakterisierung der Gittergewebe

In diesem Kapitel werden die thermischen Eigenschaften der Gittergewebe sowie die Prüfungen der Eigenstabilität, die mechanischen Kennwerte und die Drapierfähigkeit beschrieben. Um ein

optimales Verarbeitungsfenster für Gittergewebe zu definieren, werden über TGA der Temperaturbereiche festgelegt, bei denen ein Materialabbau eintritt. Die DSC dient der Festlegung von Glasübergangs-, Schmelz- und Zersetzungstemperaturen. Durch diese Erkenntnisse kann eine Empfehlung zu der späteren Verarbeitungstemperatur der SG-Schmelze abgegeben werden. Die Drapierfähigkeit wird anhand der DIN SPEC 8100 und dem Scherrahmenversuch gemessen, um den Kraftaufwand während der Drapierung sowie die Abweichung der Faserorientierung und die Falt-/Beulcharakteristik zu überprüfen. Anhand dieser Ergebnisse können die Drapierfähigkeit sowie deren Grenzen beschrieben werden. Zusätzlich erfolgt eine bauteilbezogene Drapierung an einem lasergesinterten Teilstück des aktuellen SG-Werkzeugs aus der Serie, sodass die Konturen explizit nachgebildet und eventuelle kritische Bereiche gekennzeichnet werden. Diese bilden die Grundlage der faserverbundgerechten Umkonstruktion des KUM.

Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Bei der verwendeten TGA handelt es sich um eine *TG 209F1 Libra* der Fa. *Netzsch*. Die Messungen erfolgen unter Sauerstoffatmosphäre mit einer Heizrate von 15 K/min. Die Starttemperatur T_{\min} liegt bei 20°C und steigt bis T_{\max} 850°C an.

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Die DSC Messung der PP-Infusion erfolgt, um eine Aussage über das thermische Verhalten zu erzielen. Bei der konventionellen DSC Messung werden Probe und Referenzprobe einem definierten Zeit-Temperatur-Programm unterzogen. Dabei wird die benötigte Wärmemenge bzw. Enthalpie gemessen, die notwendig ist um die Proben zu erwärmen. Die ermittelten Wärmestromdifferenzen werden als Funktion über der Zeit oder Temperatur dargestellt. Als Ergebnis erhält man ein Wärmestromsignal, welches sich wie folgt zusammensetzt:

$$dQ = m * c_p(T) dT$$

Gleichung 11

$$Q = m * \Delta H = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$$

Gleichung 12

Q	Wärmemenge [J]	m	Probenmasse [kg]
c_p	Wärmekapazität [J/(kg*K)]	T	Temperatur [K]
H	spezifische Enthalpie [J/kg]	T_1 bzw. T_2	temperaturabhängige Phasenumwandlung

Die Probe wird für die meisten Untersuchungen mehrmals hintereinander dem gleichen Temperaturprogramm (Heat-Cool-Heat) ausgesetzt. Die DSC-Kurve der ersten Messung lässt Rückschlüsse auf die thermische Vergangenheit des Materials zu. Ein zweiter Durchlauf zeigt die Lage der Materialkennwerte (T_g , T_m , etc.) [82]. Die Messung erfolgt unter Stickstoffatmosphäre mit einer Aufheizrate von 10 K/min und einer Kühlrate von 5 K/min. Der Temperaturbereich der Untersuchung liegt zwischen 10 - 300°C.

Streifenzugversuch

Mit dem Streifenzugversuch können die Höchstzugkraft σ_M und die Höchstzugkraft-Dehnung ε_M ermittelt werden. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN ISO 13934-1 [83] mit einer Probenbemaßung ($L \times B$) von 300 x 65 mm und einer Einspannlänge von 250 mm. Der Versuch wird auf einer *Zwick Roell* vom Typ Z020 mit einer 20 kN Kraftmessdose und einer aufgebrachten Vorspannung von 5 N durchgeführt. Die Vorkraft wird mit 10 mm/min angefahren und wechselt dann in die Messgeschwindigkeit mit 20 mm/min. Die Prüfung erfolgt jeweils in Schuss- und in Kettrichtung.

Drapetest

Die Drapierfähigkeit wird mit Hilfe der 2015 veröffentlichten Norm DIN SPEC 8100 [84] ermittelt. Abb. 43 zeigt den Prüfaufbau mit Probekörperaufnahme, Umformungskörper und Kamerasystemen. Der Probekörper (in diesem Fall das Gittergewebe) ist kreisrund und besitzt einen Durchmesser von 327 ± 3 mm. Er wird auf die Auflagefläche des Probekörperhalters aufgelegt und mittig ausgerichtet. Anschließend wird mit der Gesamtbildkamera ein Bild des unverformten Probekörpers aufgenommen und daraus die Unrundheit bestimmt. Der Rückhaltering wird aufgelegt und mit den Haltevorrichtungen fixiert, ohne den Probekörper zusätzlich zu komprimieren. Daraufhin wird allseitig gleichmäßig ein pneumatischer Rückhaldedruck aufgebracht. Der Standardwert beträgt hier 1 bar [84].

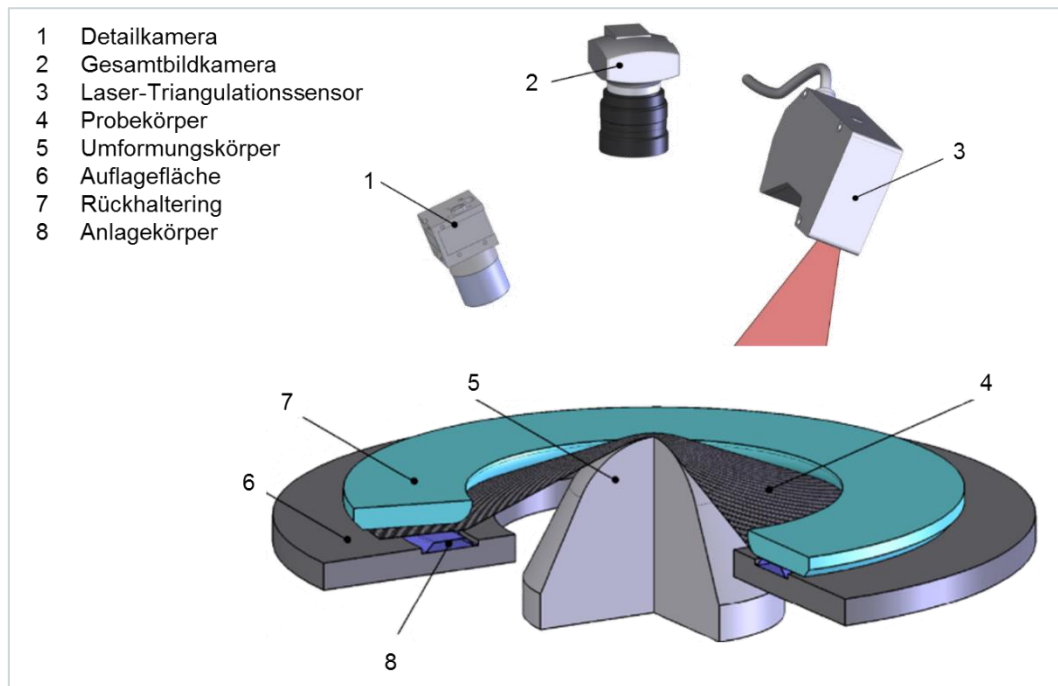


Abb. 43: Prinzipskizze Drapetest mit Probekörperaufnahme, Umformungskörper und Kamersystemen, modifiziert [84]

Nach Starten der Prüfung wird zuerst die Oberfläche des unverformten Probekörpers von der Detailkamera erfasst, um die Orientierung des Probekörpers vor Beginn der Prüfung festzuhalten. Anschließend fährt der Umformungskörper auf die erste Drapierstufe. In diesem Fall wird in acht Drapierstufen gemessen, wobei jede Stufe 10 mm beträgt. Die Messung beginnt bei 0 mm und endet bei 80 mm. Jeweils nach Erreichen einer Stufe erfolgen die Kraftmessung und die Bildaufnahme der Oberfläche des Probekörpers entlang einer zentrischen kreisförmigen Bahn. Anschließend erfolgt die Erfassung der Oberflächenstruktur mittels des Laser-Triangulationssensors. Die Anzahl der Aufnahmen pro Umdrehung ist abhängig von der Textilarchitektur. Bei 0°/90°-Architekturen sind 45°-Winkelstufen vorzusehen (0°, 45°, 90°, 135°) - 4 Richtungen / 8 Bilder [84].

Scherrahmenversuch

Um die Faltenbildung während des Drapiervorgangs genauer zu untersuchen, wird auf einen Scherversuch mittels Scherrahmen zurückgegriffen. Die Scherdeformation der Gittergewebe bildet die Diskussionsgrundlage für etwaige Zu- oder Einschnitte, um eine Faltenbildung während der Verarbeitung zu vermeiden. Ebenfalls lassen sich auf Basis der Scherkennwerte Bauteilgeometrien und Werkzeugkonzepte anpassen. Die Gewebeproben werden für die Versuchsdurchführung in einen Scherrahmen geklemmt und mit dem Rahmen in eine Universalzugprüfmaschine, wie in Abb. 44 zu sehen, eingespannt. Die Versuche erfolgen am PUK der Techni-

schen Universität Clausthal. Während der Prüfung wird der Kraft-Weg Verlauf aufgezeichnet. Die Prüfgeschwindigkeit liegt bei 50 mm/min [45]. Der Scherwinkel φ kann nach Gleichung 13 berechnet werden. Dabei ist h der gemessene Verformungsweg des Scherrahmens und a die Seitenlänge des Scherrahmens (hier 145 mm).

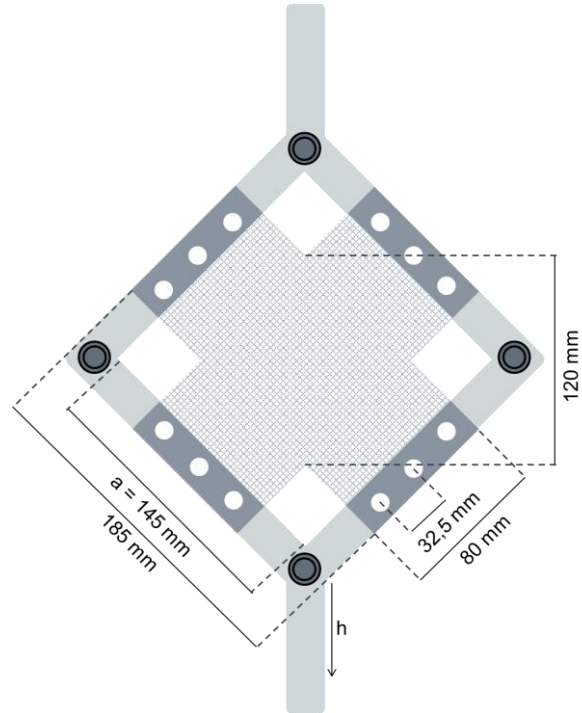
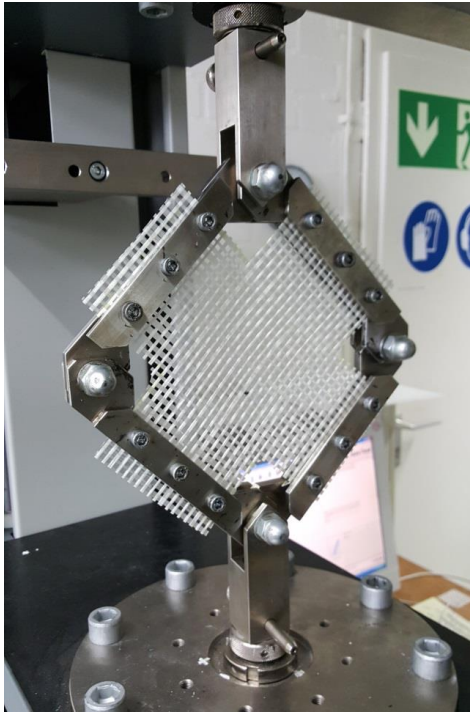


Abb. 44: Scherrahmen mit Gewebe PP-3x3(PUK, TU Clausthal);
Foto von Gittergewebe (links) und Schema (rechts)

$$\varphi = 90 - 2 \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{h}{2a} \right)$$

Gleichung 13

Die resultierenden Scherkraft-Scherwinkel Diagramme lassen Rückschlüsse auf die zu erwartende Verformbarkeit zu. In der Auswertung wird zusätzlich zwischen kritischem Scherwinkel und Grenzscherwinkel unterschieden. Der Grenzscherwinkel φ_{Grenz} liegt dabei an dem Übergang vom linearen zum nicht-linearen Bereich [45]. Nach ORAWATTANASRIKUL ist der Grenzscherwinkel erreicht, sobald eine Abweichung vom linearen Kurvenverlauf von 5 % vorliegt. Ein Beispiel für diese Abweichung ist in Abb. 45 zu sehen. Dargestellt ist die Scherkraftabweichung [%] über dem Scherwinkel [°] für ein Mehrlagengestrick [85]. Der kritische Scherwinkel beschreibt den Punkt der maximalen Fadenverdichtung und zeigt den Punkt der ersten Faltenbildung. Für die Ermittlung von Reibverlusten innerhalb des Rahmens wird ein Versuchsdurchlauf ohne Gewebe durchgeführt.

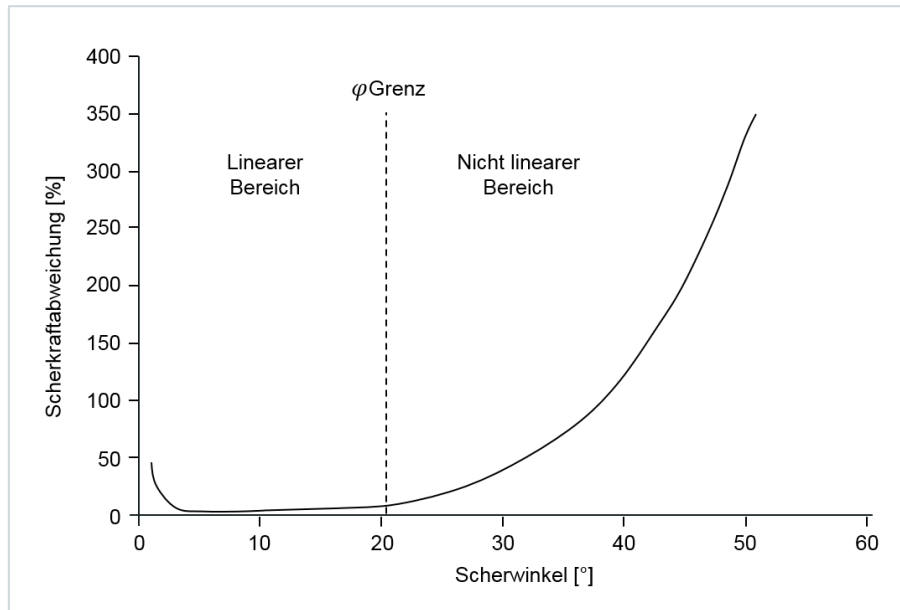


Abb. 45: Prozentuales Scherkräfteabweichungs-Diagramm, modifiziert [85]

Lasergesintertes Modell

Weiterhin wird die Drapierfähigkeit der Textilie in Anlehnung an die Geometrien des späteren Zielbauteils untersucht. Dabei werden die Textilie über unterschiedliche, im Werkzeug auftretende Radien drapiert und die Verschiebung der Rovings gegenüber der Ausgangslage gemessen. Als Kontur dient ein lasergesintertes 3D-Modell des Spritzgusswerkzeugs. Es wird hierfür lediglich der relevante, zu verstärkende Seitenbereich des KUM gesintert und betrachtet (Abb. 46). Ein weiteres Sintermodell mit verschiedenen Radien dient zur Vervollständigung der Messreihe. Um auch minimale Verschiebungen wahrzunehmen, wird der zu drapierende Bereich gekennzeichnet und sowohl vor als auch nach dem Drapiervorgang unter dem Mikroskop begutachtet. Der Probenumfang beträgt fünf Messungen. Der Versuch wird mit und ohne Vorwärmung der Textilie durchgeführt. Ein passendes Temperaturfenster wird im Vorfeld über eine DSC ermittelt.

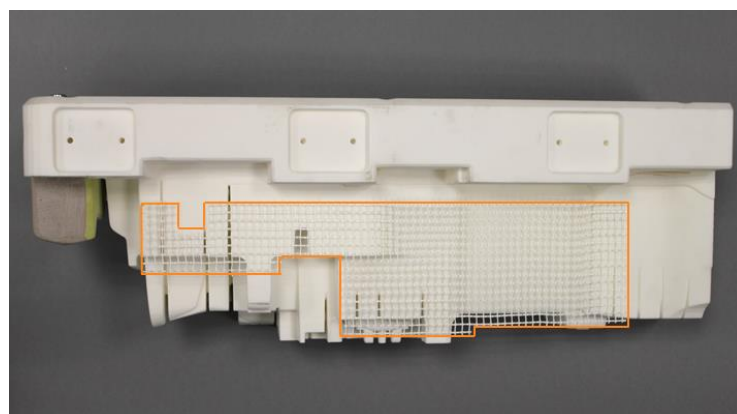


Abb. 46: Lasergesintertes 3D-Modell mit beispielhaftem Einleger (orange)

4.2.3 Herstellung der Musterplatten

In nachfolgendem Kapitel werden die Maschinentechnik sowie die Ermittlung der Spritzgussparameter zur Herstellung der 1D-Musterplatten beschrieben. Des Weiteren wird auf die Konfiguration der Gittergewebe in der Kavität und die Entnahme und Vorbereitung der Probekörper aus den Musterplatten eingegangen.

Maschinentechnik und Parameterauswahl

Sämtliche Musterplatten werden auf einer Spritzgussmaschine der Firma *KraussMaffei* vom Typ *KM 650 – 3000 / 750 CXZ* hergestellt (Abb. 47). Die Maschine verfügt über einen Drehteller und zwei Plastifiziereinheiten, die ein Bemustern von 2K-Bauteilen bzw. außermittig angespritzten Werkzeugen erlauben. Das verwendete Normalienwerkzeug (Abb. 47) besitzt mehrere Kavitäten für unterschiedliche Plattengeometrien und kann zusätzlich die Angussart variieren. Während beim Direktanguss die Schmelze radial vom Zentrum aus die Form zweidimensional füllt, verläuft der Schmelzfrontverlauf beim Filmanguss eindimensional. So entsteht über der Plattenfläche eine gleichmäßigere Ausrichtung der Kurzfasern, was die mechanischen Eigenschaften, aber auch den Verzug der Platten beeinflusst. Die Bauteildicke der Platten kann zudem über Schrauben eingestellt werden.

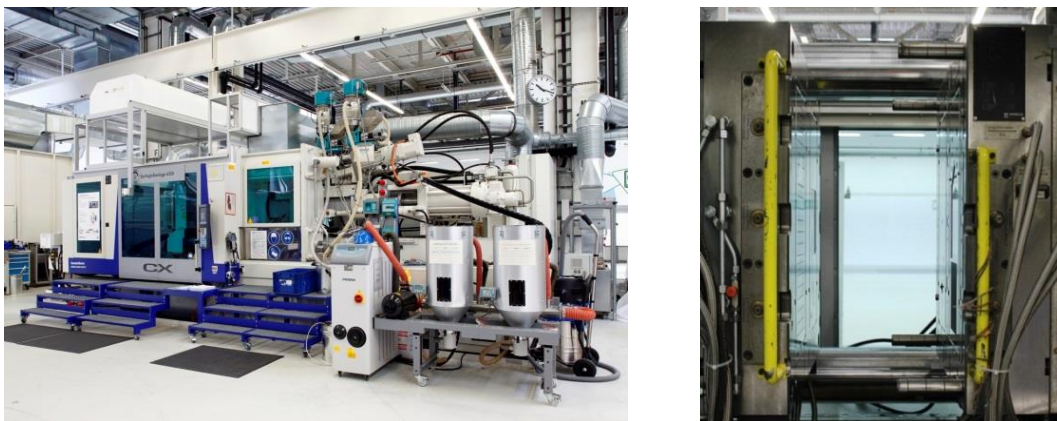


Abb. 47: Spritzgussmaschine KM 650t (links) und eingebautes Normalienwerkzeug (rechts)

Für die Herstellung der Normalienplatten kommen sowohl ein senkrecht zur Plattenebene stehender Direktanguss als auch ein in die Plattenebene verlaufender Filmanguss zum Einsatz. Die Verwendung verschiedener Angussarten soll einen möglichen Einfluss auf die Verarbeitung der Einleger und die Faserverteilung inklusive Eigenschaften der Platten prüfen. Gleichzeitig dient die Untersuchung als Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Angusses im späteren KUM-Werkzeug. Die Herstellung der Musterplatten unterliegt einem Kreuzversuchsplan. Im ersten Schritt wird für beide Angussarten eine Füllstudie durchgeführt. Die Basis für den Kreuzversuch

bilden die Faktoren und deren Ausprägungen in Tab. 13 [47]. Abb. 48 zeigt die Dimensionen der Musterplatten mit unterschiedlichen Angussarten. Die Pfeile stellen den Schmelzeffluss innerhalb der Platte dar. Die Plattendicke wird auf 2,5 mm festgesetzt und entspricht damit der Wandstärke im Serienbauteil KUM.

Tab. 13: Kreuzversuchsplan der Plattenmusterung mit Faktoren und Ausprägungen [47]

Versuchsnummer	A	B	C
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-
Faktoren	Kürzel	Minimum [-]	Maximum [+]
Werkzeugtemperatur	A	20°C	60°C
Massetemperatur	B	220°C	260°C
Einspritzgeschwindigkeit	C	55 mm/s	110 mm/s

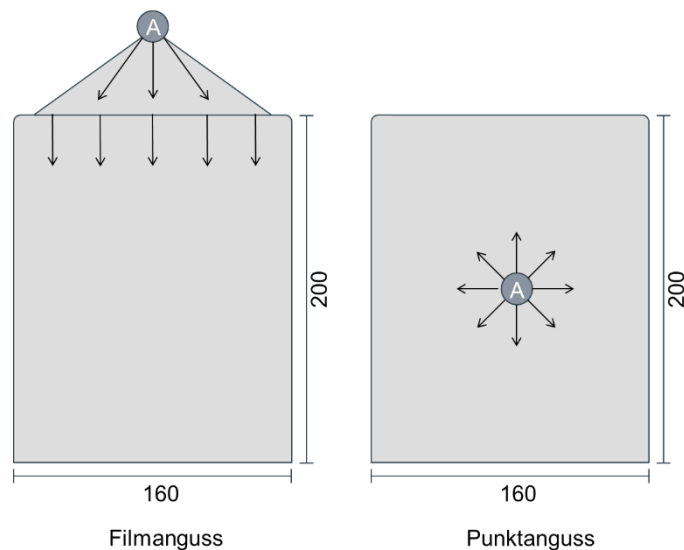


Abb. 48: Schema der Musterplatten mit unterschiedlichen Angussarten [36]

Konfiguration der Gittergewebe und Entnahme der Prüfkörper

Nach Auswahl der optimalen Parameter aus dem vorherigen Abschnitt, werden die verwendeten Gittergewebe in unterschiedlichen Ausrichtungen zu Musterplatten verarbeitet. Die Gewebe werden hierzu auf die Größe der Kavität zugeschnitten und über Klebestreifen in der Kavität

gehalten. Tab. 14 gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Konfigurationen der Einleger in einer Platte mit Filmanguss. Für eine Eingrenzung der Parameter werden die Versuche zur Ausrichtung und Materialdopplung der Gewebe ausschließlich an einer Gewebeart durchgeführt. Die Bezeichnungen Kette und Schuss beziehen sich auf die Entnahmerichtungen bei Beschnitt der Einleger. Der Ausdruck ‚innen‘ bedeutet, dass der Einleger zur festen Maschinenseite ausgerichtet ist. Die Benennung ‚außen‘ weist daraufhin, dass der Einleger zu der beweglichen Seite ausgerichtet ist.

Tab. 14: Konfiguration der Gewebeeinleger

Lagenanzahl	Ausrichtung	Lagenanzahl	Ausrichtung
Gewebe einfach	Kette innen (KI)	Gewebe doppelt	Kette 0/90°
	Kette außen (KA)		Schuss 0/90°
	Schuss innen (SI)		Kette +/- 45°
	Schuss außen (SA)		Schuss +/- 45°

Die hergestellten Musterplatten werden im Wasserstrahlverfahren für die Probenherstellung bearbeitet. Die Entnahme der Probekörper zeigt nachstehende Abbildung (Abb. 49) exemplarisch für eine Platte mit Filmanguss.

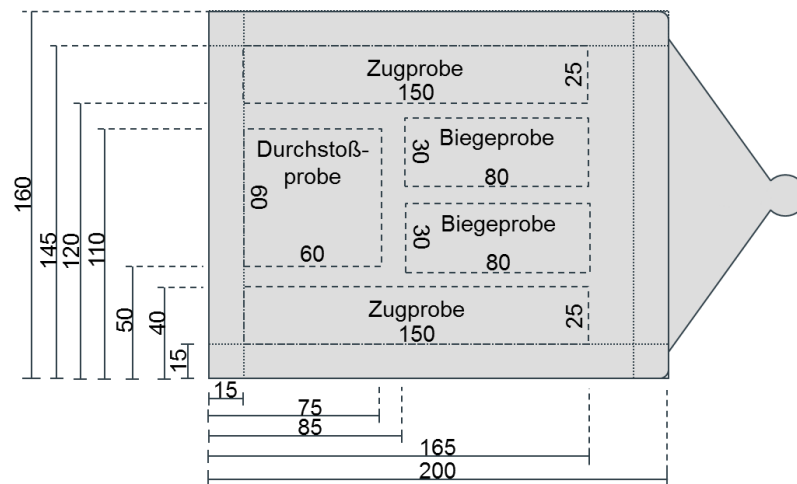


Abb. 49: Probenentnahmeplan für eine Musterplatte mit Filmanguss, Bemaßung in mm [36]

In Abb. 49 ist zu erkennen, dass ein Rand von 15 mm für die Entnahme der Probekörper ausgespart wird. In diesem Bereich der Platte befinden sich Geometrien in Form von Materialanhäufungen zur Untersuchung von Einfallstellen. Bei den Platten mit Direktanguss ist die Probekörperentnahme so auszuführen, dass die Kurzglasfasern der Matrix längs zur späteren Belastungsrichtung liegen. Der Angussbereich wird hier gezielt ausgespart, da durch ihn eine Inhomogenität an der Materialoberfläche entsteht, die die mechanischen Eigenschaften in diesem Bereich

herabsetzt. Die Fläche der Platte mit Filmanguss kann hingegen vollständig genutzt werden. Die Kurzfaserausrichtung der Probekörper sollte hier der zu prüfenden Lastrichtung entsprechen. Nachdem der Zuschnitt erfolgt ist, werden die Probekörper für die jeweiligen Tests entnommen, getrocknet und vermessen. Im Anschluss folgt eine Konditionierung unter Normklima (23°C und 50 % Luftfeuchtigkeit) bis die mechanische Charakterisierung durchgeführt wird. Der Einfluss der Konditionierung auf die Probekörpergeometrie ist marginal und kann somit vernachlässigt werden [47].

Zusatzverstärkung über TFP

In Kooperation mit dem *ITA Aachen* werden in einem Stichversuch Zusatzverstärkungen auf ein konfiguriertes Gittergewebe gebracht. Bei den Zusatzverstärkungen handelt es sich um Rovings der Carbonfaser 1, wie sie auch in den anderen Untersuchungen verwendet wird. Die Rovings werden über Tailored Fibre Placement (vgl. Kapitel 2.6.3) in einem Kreuzstich mit einem Polyesterfaden auf dem Gitter fixiert. Dabei erfolgt eine Ausrichtung der Verstärkung in 0°, 45° und 90° zur Werkzeugkavität. Die Gittergewebe werden jeweils in Kettrichtung zugeschnitten. Die Verarbeitung erfolgt mit Punktanguss nach optimierten Parametern der Tab. 13, um mögliche Staueffekte zu minimieren. Zusätzlich variiert der Abstand der aufgetragenen Rovings zwischen 0,5 - 1 mm. Abb. 50 zeigt jeweils ein Beispiel für eine Verstärkungsausrichtung. Die mechanische Charakterisierung erfolgt parallel zu den übrigen Musterplatten; beschränkt sich jedoch auf die Ermittlung der Zugfestigkeit und Durchstoßkraft.

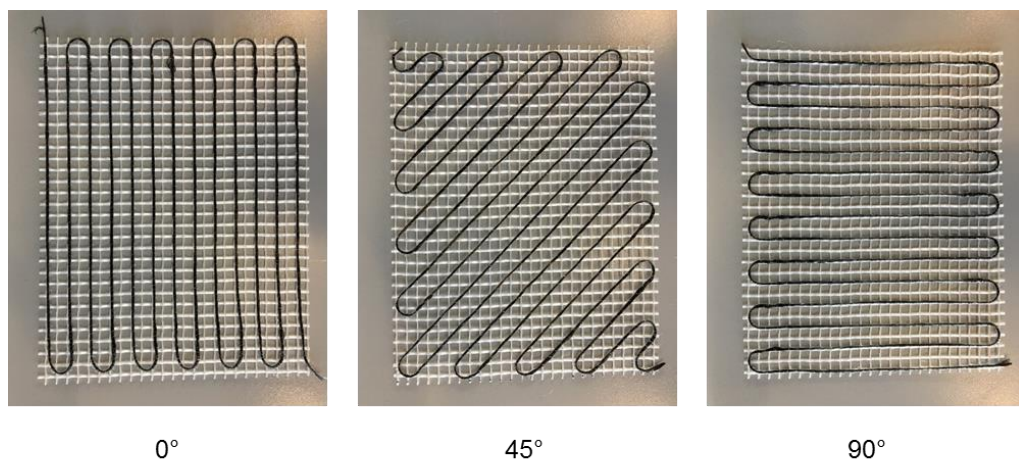


Abb. 50: Carbonverstärkung auf Glasgittergewebe; aufgebracht durch TFP in 0°, 45°, 90° Ausrichtung; Rovingabstand jeweils 1mm

4.2.4 Charakterisierung der Musterplatten

Im Folgenden werden die Prüfungen erläutert, die zur Charakterisierung der 1D-Musterplatten dienen. Die Prüfungen sind parallel zu den Untersuchungen der Verstärkungsfasern (Kapitel 4.2.1) aufgebaut, um zu beurteilen, ob sich die Kennwerte der Fasern im Verbund widerspiegeln. Gleichzeitig sollen die Möglichkeiten und Grenzen der Übertragbarkeit aufgedeckt werden. Der Faserbündelauszug ist ein innerhalb dieser Arbeit entwickelter Verfahrensansatz, welcher die Faser-Matrix Interaktion eines eingebetteten Bündels im Vergleich zum Single-Fibre Pull-Out bewertet. Hieraus können direkte Rückschlüsse auf die Haftung und somit die Kraftübertragung im Verbund gezogen werden. Die Zugprüfung an der Verbundplatte zeigt, welche Verstärkungswirkung der Gittereinleger im Vergleich zu der reinen Matrix hat und in welchem Verhältnis die Kennwerte der einzelnen Komponenten (Matrix, Gittereinleger, Filament) zu den ermittelten Ergebnissen stehen. Die dynamischen Belastungen im Schlag- und Durchstoßversuch beanspruchen primär die Faser-Matrix Interaktion und geben einen Anhaltspunkt auf das spätere Verhalten im Crashversuch. Neben mechanischen Untersuchungen werden die Platten auch über CT und Mikroskop bewertet. Das CT zeigt mögliche Verschiebungen des Gittereinlegers innerhalb des Verbunds. Die Mikroskopbilder dienen der Bewertung auftretender Grenzflächen zwischen Faserbündel und SG-Matrix und geben einen Hinweis auf eventuelle Schwachstellen des Verbunds. Über die Veraschung repräsentativer Teilproben kann der Fasergewichtsanteil bestimmt und die mechanischen Kennwerte relativ dargestellt werden.

Faserbündelauszug

Für die Beurteilung der Faserbündel-Matrix Haftung wird im Zuge dieser Arbeit ein Faserbündelauszugsversuch entwickelt. Der Versuch vergleicht die Haftung verschiedener Infusionen zu der PP-Matrix und überprüft ebenfalls die Möglichkeit, Faserbündel ohne Polymerinfusion anzuspritzen. Für die Probenpräparation werden jeweils einzelne Faserbündel aus den verwendeten Gittergeweben herausgetrennt und im Spritzgussprozess mit der Polymerschmelze angespritzt. Das Faserbündel sollte dabei vollständig von der Schmelze umschlossen sein und sich mittig in der Matrix befinden. Zudem ist das freie Faserbündel so zu fixieren, dass es nicht von der Schmelze umflossen wird. Im Auszugversuch wird der angespritzte Teil der Probe lose auf einem Auflager positioniert und das Faserbündelende zwischen zwei Aufleimer geklebt (Abb. 51). Die geometrischen Abmessungen der Probe werden auf 30 x 10 x 4 mm festgesetzt. Es ist zu beachten, dass das Faserbündel nicht während des Auszugs zerreißt.

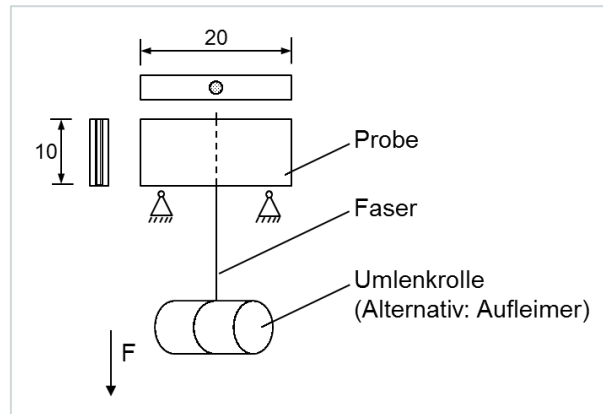


Abb. 51: Prinzipskizze einer Faserbündel-Pull-Out Probe [36]

Die Auszugproben werden mittels eines Plattenwerkzeugs mit Direktanguss angespritzt. Die Positionierung der Faserbündel in dem Plattenwerkzeug findet dabei über eine metallische Einlegerplatte statt. Die Einlegerplatte besitzt für die Faserbündel jeweils eine Fase, welche der Positionierung und Fixierung der Bündel dient. Auf der Gegenseite wird eine Magnetplatte aufgebracht, sodass die Fase der Faserbündel begrenzt ist und die Fasern selbst nur wenig Spiel haben. Daraus resultiert eine mittige Positionierung in der Kavität. Der Anguss befindet sich zentral zwischen den beiden inneren Faserbündeln. Die Anspritzversuche werden ohne Nachdruck durchgeführt, um zu verhindern, dass sich die Schmelze parallel zu den Faserbündeln innerhalb der Fasern ausbreitet. Bei der Probenherstellung werden jeweils vier Auszugproben gleichzeitig hergestellt. In Abb. 52 ist eine schematische Zeichnung der metallischen Einlegerplatte und der Magnetplatte zu sehen.

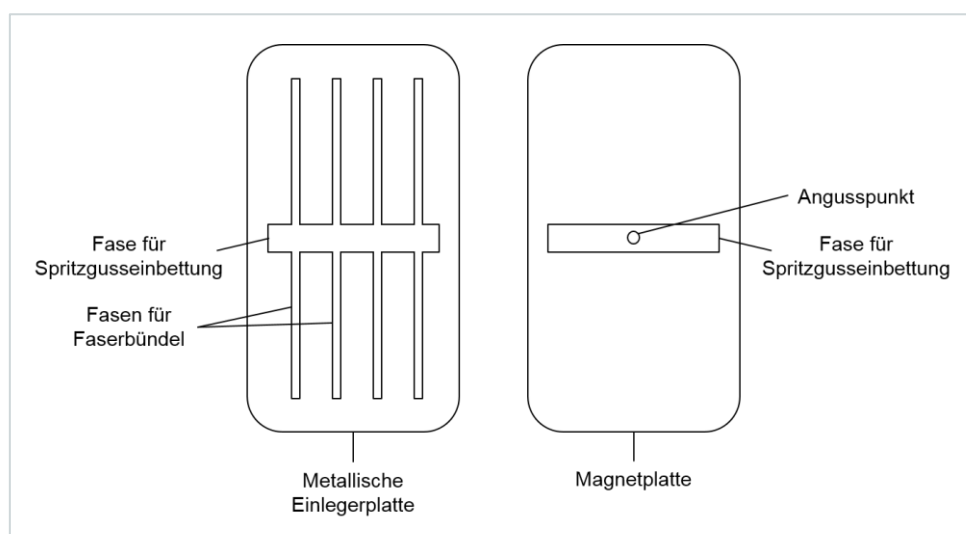


Abb. 52: Metallische Einlegerplatte und Magnetplatte zur Erstellung der Faserbündelauszugproben [36]

Die Abb. 53 zeigt exemplarisch eine angespritzte Probe nach dem Entformen. Herstellungsbedingt ist dabei ein leichter Versatz auf Höhe des Faserbündels zu beobachten. Dieser rührt aus dem Übergangsbereich zwischen Metalleinleger und Magnetplatte.

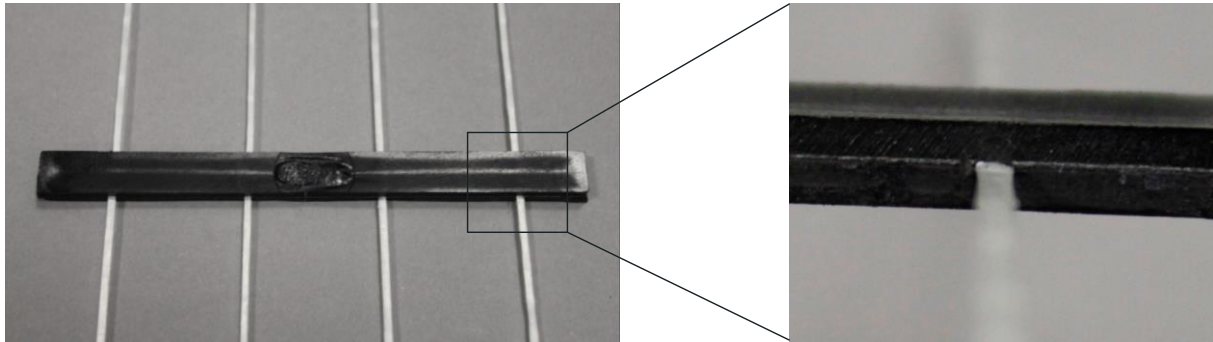


Abb. 53: Angespritzte Auszugsprobe mit vier Faserbündeln (links) und Detailaufnahme eines angespritzten Faserbündels (rechts) [36]

Eine Voruntersuchung zum Anspritzen von Faserfilamenten ohne Beschlichtung/Infusion zeigt mit oben beschriebenem Aufbau, dass der Schmelzestrom zu einer unkontrollierten Verschiebung der einzelnen Filamente in Fließrichtung (im Probenbeispiel quer zum Faserfilament) führt. Demzufolge ist keine gradlinige Krafteinleitung ins Filamentbündel möglich.

Im Zugversuch werden die Fasern in Faserrichtung aus der Matrix herausgezogen. Dazu werden Aufleimer an den Bündelenden angebracht, um eine Faserschädigung durch die Spannbacken der Zugmaschine zu vermeiden. In der Prüfvorrichtung wird der Kunststoffteil der Probe lose auf einer Metallvorrichtung als Auflager positioniert (Abb. 54) um eine Verfälschung der Ergebnisse durch mögliche eingebrachte Druckspannungen der Spannbacken zu verhindern. Der Auszugversuch wird mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt. Dabei wird als Vergleichswert die maximale Auszugskraft herangezogen.



Abb. 54: Faserbündelauszugsprobe (links), Auszugsprobe mit aufgebrachten Aufleimern (mitte) und Einspannung der Probe im Auszugversuch (rechts) [36]

Glasfaseranteil mittels Veraschungsmethode

Der Textilglasgehalt wird nach DIN EN ISO 1172 [86] bestimmt. Die Veraschung im Muffelofen erfolgt bei 625°C mit Proben der Größe 30 x 15 mm. Dabei ist die Probengröße so gewählt, dass unabhängig von dem Gittergewebe eine repräsentative Menge an Verstärkungsfasern im Rückstand zu finden ist. Der Glasfaseranteil lässt sich nach Gleichung 14 wie folgt ermitteln:

$$M_{Glas} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100$$

Gleichung 14

M_{Glas}	Glasfaseranteil in %	m_2	Tiegel mit Probe vor dem Veraschen
m_1	Tiegel leer	m_3	Tiegel mit Rückstand nach dem Veraschen

Makroschliffbilder

Die Erstellung von Schliffbildern dient der Untersuchung der Grenzflächenbildung im Verbund zwischen Matrix und Gittergewebeeinleger. Zusätzlich werden die einzelnen Komponenten untersucht, um den Imprägnierungsgrad der Einleger und die Verteilung der Kurzglasfasern festzustellen. Die Proben werden in einem Epoxidharz *Technovit® EPOX* eingebettet und mit einer Schleifmaschine *ATM Saphir 550* im Gegenlauf bearbeitet. Zwischen den Schleifschritten werden die Proben jeweils für 3 min im Ultraschallbad in einer Reinigungslösung (*Tickopur RW77*) gesäubert. Tab. 15 gibt eine Übersicht über die Schliffparameter. Abb. 55 zeigt die Schliffebenen der Einzelfaser- und Plattenuntersuchungen.

Tab. 15: Schleif- und Polierparameter

Unterlage	Körnung / Rauheit	Zusatz	Drehzahl [U/min]	Anpresskraft [N]	Schleifzeit [s]
Siliciumcarbid Nassschleifpapier	500	Wasser	150	10	bis plan
Siliciumcarbid Nassschleifpapier	800	Wasser	150	10	120
Siliciumcarbid Nassschleifpapier	1200	Wasser	150	10	120
Siliciumcarbid Nassschleifpapier	2500	Wasser	150	10	120
Poliertuch	9 µm	ATM Diamant Suspension Mono	150	10	120
Poliertuch	6 µm	Lubricant yellow + Diamant Suspension	150	10	120
Poliertuch	3 µm	Lubricant yellow + Diamant Suspension	150	10	120
Poliertuch	1 µm	Lubricant yellow + Diamant Suspension	150	10	120

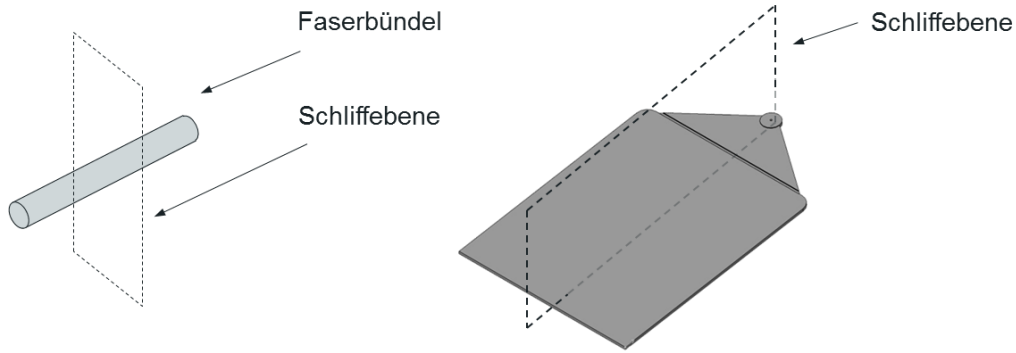


Abb. 55: Schliffebenen bei Einzelfaser- und Plattenprüfung [36]

Computertomographie

Um eventuelle Verschiebungseffekte in den hergestellten Musterplatten zu beurteilen, wird die Computertomographie auf Basis der Röntgendurchleuchtung als zerstörungsfreie Werkstoffprüfung eingesetzt. Dazu wird die Probe in einem drehbaren Halter fixiert und sowohl frontal als auch mit einem sogenannten Winkelscan von den Röntgenstrahlen durchleuchtet. Um das Auflösungsvermögen bei dieser Technik zu erhöhen, wird nur ein bestimmter Bereich (Region of Interest) betrachtet. Da die Bildqualität bei dieser Technik von der Röntgenstrahlenabsorption abhängig ist, sind Proben mit einem großen Flächen-Dickenverhältnis nachteilig. Bei breitseitiger Bestrahlung (Flächenscan) wird wesentlich weniger Strahlung/Fläche absorbiert, als bei einer Aufnahme quer zur Fläche. Besonders bei einem Winkelscan muss dieser Effekt beachtet werden. Die Schwächung des Primärstrahls ist auch davon abhängig, wie röntgendicht die untersuchten Elemente sind [47] [87].

Zugversuch

Im Zugversuch werden die mechanischen Kennwerte wie der Young's Modul (Elastizitätsmodul) und die Zugfestigkeit der Musterplatten ermittelt. Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 [88], welche die Bestimmung der Zugeigenschaften von isotrop und anisotrop faserverstärkten Kunststoffen definiert. Aufgrund der eingeschränkten Plattenlänge, sind die Zugprobekörper auf ein Maß von (LxBxH) 150 x 25 x 2,5 mm festgesetzt. Für die Bestimmung des E-Moduls wird eine Vorkraft von 5 N angelegt und die Prüfgeschwindigkeit auf 2 mm/min geregelt. Der Weg wird über die Traverse aufgenommen. Einspann- und Messlänge betragen 60 mm. Der E-Modul wird über die Steigung der Kurve im Spannungs-Dehnungsdiagramm im Bereich von 0,05-0,25 % der Dehnung ermittelt. Nach Überschreiten der 0,25 % wird die Prüfgeschwindigkeit auf 10 mm/min erhöht und die Probe bis zum Versagen auseinandergezogen. Dabei werden die maximale Zugspannung, die Bruchspannung und die Bruchdehnung ermittelt. Pro Einlegervariante werden fünf Proben geprüft.

Biegeversuch

Nach GRELLMANN [82] ist die Biegebeanspruchung eine der häufigsten Belastungsarten, denen Bauteile im Alltag ausgesetzt sind. Durch den Dreipunkt-Biegeversuch werden der Biege-E-Modul, die Randfaserdehnung und auch die Biegefestigkeit des Materials bestimmt. Da die untersuchten Proben größtenteils aus der PP-GF 30 Matrix bestehen, greift an dieser Stelle die DIN EN ISO 178 [89]. Ebenfalls kann durch Verwendung der Norm eine Vergleichbarkeit zum reinen Matrixmaterial hergestellt werden (vgl. Technische Lieferbedingung (TL)). Die Norm besagt, dass das Stützweiten-/ Dickenverhältnis von 1:16 auf ein Verhältnis von bis zu 1:60 änderbar ist, sobald eine große Dicke der Proben vorhanden ist. Dies trifft im vorliegenden Fall nicht zu. Dennoch wird das Stützweiten-/ Dickenverhältnis entsprechend der Forderung der TL von 1:16 auf 1:24 erweitert, um die entstehenden Scherbelastungen während der Prüfung zu minimieren.

Die Probekörper besitzen die Maße (LxBxH) 80 x 30 x 2,5 mm. Sie werden mittig auf den Auflagern positioniert. Die Auflager selbst verfügen über einen Auflageradius von 2 mm und haben einen Abstand von 60 mm. Die Krafteinleitung erfolgt über die Traverse, an der eine Druckfinne mit einem Radius von 5 mm angebracht ist. Wie bei dem Zugversuch, werden auch bei dieser Methode die Kennwerte über ein Spannungs-Dehnungsdiagramm ermittelt. Die eingestellte Vorkraft beträgt 3 N und die Prüfgeschwindigkeit für die Bestimmung des E-Moduls liegt bei 2 mm/min. Anschließend wird die Prüfung mit einer Traversengeschwindigkeit von 14 mm/min fortgesetzt. Der Umfang je Versuchsreihe enthält mindestens fünf Proben. Da die endlosfaserverstärkende Komponente aus verfahrenstechnischen Gründen immer auf einer Seite des Probekörpers liegt, muss bei der Versuchsdurchführung unbedingt darauf geachtet werden, dass die Seite mit der Verstärkung eine Zugbelastung erfährt.

Schlagzähigkeit

Um das Zähigkeitsverhalten der Proben gegenüber einer schlagartigen Biegebeanspruchung zu untersuchen, wird die instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 179-2 [90] auf einem Pendelschlagwerk der Firma *Zwick* durchgeführt. Die Probenabmessungen (LxBxH) von 120 x 15 x 2,5 mm sind in Anlehnung an die TL gewählt. Für den Versuch wird die ungekerbte Probe mittig auf den Widerlagern des Schlagwerks platziert und breitseitig von der Hammer-schneide des Pendels zerschlagen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schneide die Probe sowohl vertikal als auch horizontal mittig trifft. Um dies zu ermöglichen, können die Widerlager mit entsprechenden Distanzstücken an die Probengröße angepasst werden.

Die Charpy-Schlagzähigkeit ist der Quotient aus der verrichteten Arbeit zur Querschnittsfläche der Probe und wird in kJ/m² angegeben. Die zuvor erwähnte außerszentrische Lage der Endlosfa-

serverstärkung bedingt auch bei diesem Versuch, dass die verstärkte Seite einer Zugbelastung ausgesetzt sein muss. Es ist demnach notwendig, dass die Hammerschneide die Probe, ähnlich der Finne beim Biegeversuch, auf der unverstärkten Seite trifft. Aus dieser Bedingung ergibt sich, dass nur ein breitseitiger Schlag (flatwise) in Frage kommt.

Durchstoßversuch

Der Durchstoßversuch ist eine schlagartige Belastungsprüfung für flache Proben, die in der DIN EN ISO 6603-2 [91] geregelt ist. Der Versuch dient dazu, Erkenntnisse über das Verbundverhalten innerhalb der Platte bei hochdynamischer Beanspruchung zu erzielen. Diese Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf das Verbundverhalten im KUM während des Crashversuchs zu. Die Versuche werden auf einer hydraulischen Anlage der Firma *Zwick* durchgeführt und zeigen, wie sich Materialien bei einer mehrachsigen punktuellen Schlagbelastung verhalten. Hierfür wird die fest eingespannte Probe von einem Stoßkörper mit einer konstanten Geschwindigkeit von 4,4 m/s durchstoßen. Über integrierte Kraft-Weg-Aufnehmer wird ein entsprechendes Kraft-Verformungs-Diagramm erzeugt. Das Diagramm spiegelt sowohl die maximale Kraft F_{\max} , als auch die bei dieser Kraft wirkende Dehnung und die aufgenommene Energie wieder. Die gesamte Durchstoßenergie wird durch die Fläche unter dem Kraft-Verformungs-Diagramm beschrieben. Der Durchmesser der Probekörperauflage beträgt 40 mm, der des Stoßkörpers 20 mm. Je Versuchsreihe werden bis zu sechs Probekörper mit den Maßen ($L \times B \times H$) 60 x 60 x 2,5 mm verwendet. Wie bei allen mehrachsigen Belastungsprüfungen, muss auch in diesem Fall die Gewebeverstärkung auf der dem Stoßkörper abgewandten Seite liegen. Bei der Durchführung der Versuche ist darauf zu achten, dass der Stoßkörper eingefettet ist, um die Reibung bei Stoßbelastung zu minimieren. Alle Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt.

4.2.5 Umsetzung in das Bauteil KUM

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Herstellung der partiell endlosfaserverstärkten KUM im Spritzguss. Um Aussagen über den Effekt der Verstärkung treffen zu können, werden die produzierten Teile zu kompletten Zusammenbauteilen (ZSB) montiert und dem Serienstand gegenübergestellt.

Maschinentechnik und Prototypenwerkzeug KUM

Die Herstellung der KUM erfolgt auf einer Spritzgussmaschine der Firma *KraussMaffei* mit einer Schließkraft von 2300 t. Für eine automatisierte Entnahme ist ein Sechssachs-Roboter der Firma *Kuka* auf der Anlage montiert. In den ersten Versuchen werden die vorkonfektionierten

Gewebezuschnitte, ähnlich wie in Kapitel 4.2.3, mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband in der Kavität der beweglichen Werkzeugseite befestigt. Danach wird das Werkzeug geschlossen und das PP-GF30 eingespritzt.

Die Kontureinsätze im Prototypenwerkzeug werden in Anlehnung an die Seriengeometrie des KUM *Tiguan* gefertigt. Das Prototypenwerkzeug selbst besteht aus Stahl, um den Wärmehaushalt im Werkzeug sowie das Kristallisationsverhalten der Schmelze seriennah zu gestalten. Um eine Wiederverwendbarkeit des Werkzeugunterbaus und des Formrahmens zu ermöglichen, sind diese unabhängig von den Kontureinsätzen ausgeführt (Abb. 56). Die in Türkis dargestellten Wechseleinsätze zeigen die Bauteilkonturen, die für das Verhalten im Crash relevant sind. Der Wechseleinsatz kann für eine spätere Geometrieänderung in diesem Bereich entnommen und neu gefertigt werden. Die Formteillfüllung erfolgt über eine Kaskadensteuerung mit sechs Anspritzpunkten (drei im Ober- und drei im Untergurt). Die Anspritzung erfolgt direkt aufs Bauteil. Die Werkzeugkühlung ist entsprechend des Zielbauteils seriennah ausgelegt.

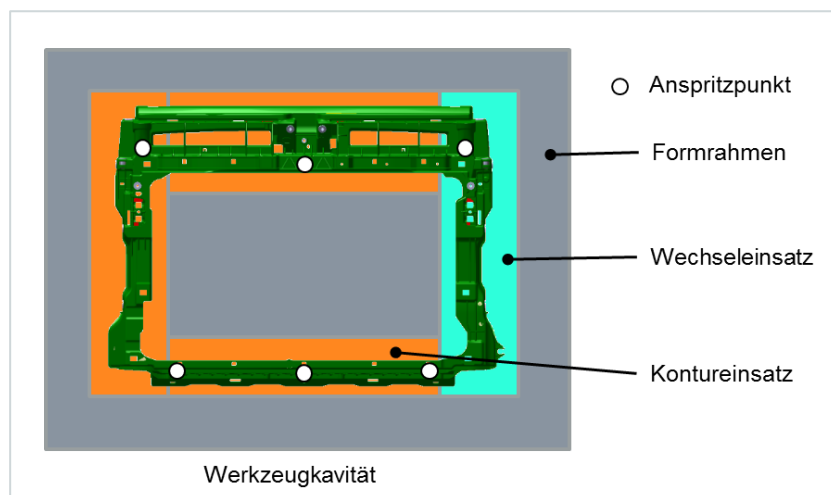


Abb. 56: Schema der Werkzeugkavität mit Formrahmen (grau), Wechseleinsatz (türkis) und Kontureinsätzen (orange)

Die Parameter für die Herstellung der FVK-Kunststoffmontageträger orientieren sich an dem Kreuzversuchsplan der Musterplatten (vgl. Kapitel 4.2.3, Tab. 13). Dabei sind auch hier die gewählten Faktoren die Einspritzgeschwindigkeit, die Massetemperatur und die Werkzeugtemperatur. In Bezug auf die Ergebnisse der Plattenmusterung wird der Versuchsplan gegebenenfalls für die FVK-Musterung angepasst.

4.2.6 Konzeptnachweis am Bauteil

Der Konzeptnachweis am Bauteil orientiert sich an den internen Entwicklungsprüfbedingungen der Volkswagen AG. Diese sind unter anderem ein Indikator für die erfolgreiche Freiprüfung und

die Implementierung neuer Bauteile in die Serie. Neben der Verbauprüfung werden Fanghakenkräfte über das Motorhaubenschloss am Obergurt gemessen, um zu prüfen, ob die Geometrieänderung der FVK-Variante Einfluss auf die Stabilität des Obergurts beim Haubenzufall hat. Der Dauerschwingversuch überprüft das Langzeitverhalten des ZSB-Frontends (KUM inklusive Anbauteile) in zwei Etappen und ermittelt über unterschiedliche Messpunkte die Verformungen nach der Dauerbelastung. Der Klimawechseltest dient der Qualitätsprüfung der gefertigten Bauteile und zeigt Farbveränderungen und Rissbildungen auf. Die Überprüfung des Verhaltens unter dynamischer Belastung erfolgt mit einem modifizierten Schlittencrashaufbau. Diese zerstörende Prüfung imitiert ähnliche Bedingungen, wie bei einem Frontalaufprall und soll die Ergebnisse des Durchstoßversuchs anhand der Musterplatten am realen Bauteil bestätigen.

Fanghakenkräfte

Der Prüfstandsversuch ‚Fanghakenkräfte‘ lässt sich in eine dynamische und eine statische Komponente unterteilen. Die Krafteinleitung erfolgt jeweils über das Schloss im Obergurt. Die maximalen und minimalen Kräfte der Prüfung werden im Vorfeld individuell für jede Fahrzeugklasse bestimmt. Der dynamische Teil simuliert eine Entriegelung der Frontklappe (Zugbelastung: ~1500 N) bei maximaler Geschwindigkeit (v_{\max}) sowie den Haubenzufall (Druckbelastung: ~3000 N) und die damit verbundenen Einwirkungen auf das ZSB-Frontend. Abb. 57 zeigt den schematischen Ablauf der dynamischen Versuchskomponente. Der einzelne Versuchszyklus besteht aus 10 Einzelmessungen. Dabei werden die Belastungen (Zug- oder Drucklast) ruckartig innerhalb von 0,2 s in das Schloss eingeleitet. Die Prüfung erfolgt bei 85°C, 23°C (RT) und -30°C.

Bei der statischen Komponente wird die maximale elastische Verformung gemessen, die durch den Auftrieb der Frontklappe bei v_{\max} entsteht. Das Erreichen der maximalen Zugbelastung wird durch schrittweise Erhöhung der Prüfkraft von 0 N auf ~2000 N realisiert. Dabei wird die Belastung in 200 N Schritten mit jeweils 10 s Haltezeit in Zugrichtung des Fanghakens eingeleitet. Nach der Haltezeit fährt die Prüfkraft für mindestens 60 s auf 0 N zurück, bevor das nächste Intervall angesteuert wird. Zusätzlich zu den Prüfungen bei Raumtemperatur (RT) werden auch Zyklusversuche bei -30°C und +85°C durchgeführt. Dabei dürfen in beiden Fällen keine sichtbaren Schäden, wie Risse/Brüche, Farbveränderungen oder Aufschuppungen am Bauteil zu sehen sein. Abb. 57 zeigt die für diese Arbeit relevanten Verformungsmesspunkte (MP). Messpunkt 1 liegt in Y-Richtung in Höhe des Kraftangriffspunkts und in X-Richtung möglichst weit am hinteren Rand des Obergurts. Die Messpunkte 2 und 3 sind auf dem Obergurt in X möglichst nah am Schloss und in Y in Flucht der Schlossverschraubung anzubringen. MP 6 und MP 7 befinden sich an den äußeren Rändern des Obergurts in Nähe der seitlichen Befestigungen.

Um die Verstärkungswirkung des Gittergewebes in diesem Versuch bewerten zu können, wird zusätzlich ein KUM ohne jegliche Verstärkung getestet. Die Prüfungen erfolgen bei 85°C, was für diesen Versuch in Kombination mit dem eingesetzten PP als kritische Temperatur zu betrachten ist.

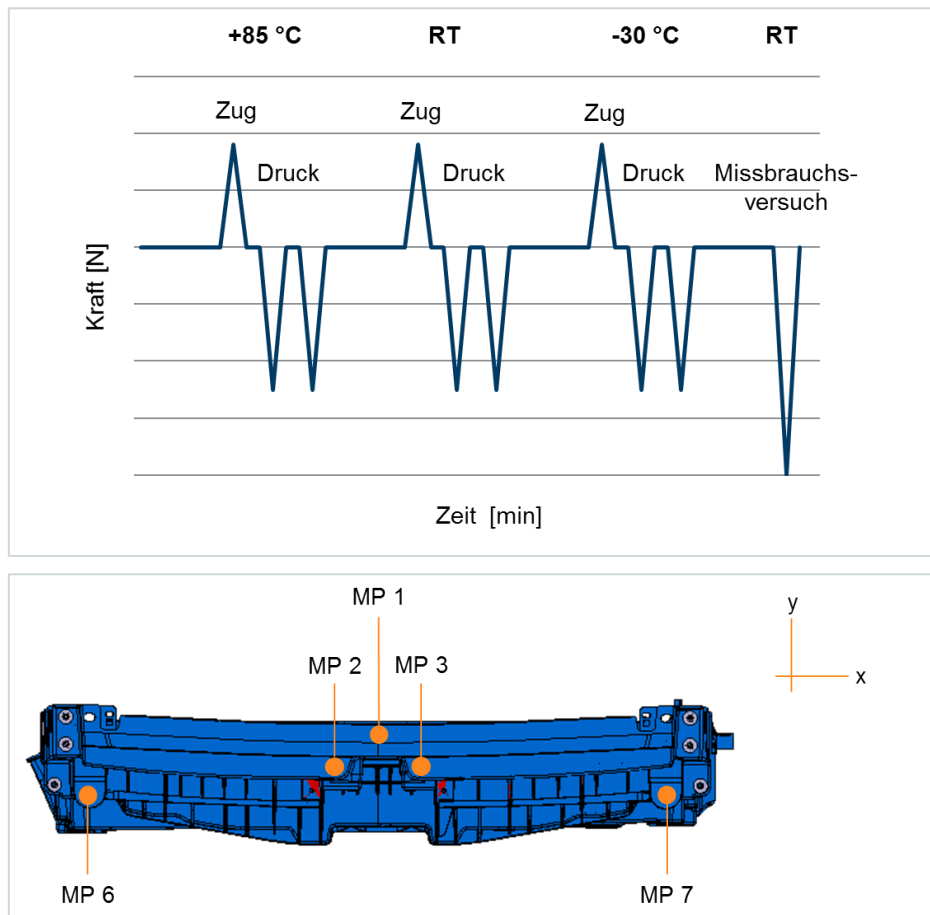


Abb. 57: Schematischer Ablauf der dynamischen Prüfkomponente (oben) und Verformungsmesspunkte (MP) am KUM (unten) [59]

Dauer-Schwingversuch

Der Dauer-Schwingversuch prüft, ob das ZSB Frontend die Schwingbelastungen des Fahrtriebs bei gleichzeitiger Temperaturbelastung unbeschadet übersteht. Nach der Klimatemperaturlagerung erfolgt eine visuelle Kontrolle des ZSB Frontends und der beteiligten Baugruppen und Bauteile. Der ZSB Frontend muss einen sicheren und stabilen Festsitz aufweisen. Bleibende sichtbare Verformungen sowie Brüche und Risse oder Farbveränderungen sind unzulässig. Die Anbindungspunkte müssen intakt sein.

Für den Versuchsaufbau muss das ZSB vollständig auf einer vertikalen Belastungseinheit (mechanischer Rütteltisch, hydraulischer Pulser, elektrodynamischer Schwinger) positioniert wer-

den. Die Belastungsrichtung erfolgt in Z (Fahrzeugrichtung) und muss den in Tab. 16 aufgeführten Lastspielen standhalten.

Tab. 16: Ablaufplan Dauer-Schwingversuch ZSB Frontend

Beschreibung		Einheit	Wert
Prüffrequenz		1/min	9,9 - 11,6 Hz
Belastungskollektiv Lastwechsel	Teil 1	/	$\geq 10.000.000$
	Teil 2	/	$\geq 3.000.000$
Erlaubte Schwing- beschleunigung	Teil 1	m/s ²	34
	Teil 2	m/s ²	45
Temperaturbelastung		°C	100 ± 2
Messstelle		/	Mittig auf dem Kühlungsmodul

Klimawechseltest

Der Klimawechseltest dient der Qualitätsprüfung von Fahrzeugteilen unter zyklischen Klimawechselbedingungen. Im Fokus stehen die Anfälligkeit für Rissbildung, Verformung und Lösen des Verbunds. Das Bauteil ist hierfür in der Klimakammer zu positionieren und dem in Abb. 58 dargestellten Temperaturprogramm zu unterziehen. Die interne Prüfnorm ist als PV 2005 hinterlegt. Im Anschluss an die Prüfung wird das Bauteil optisch untersucht und auf seine Verbaufähigkeit hin getestet.

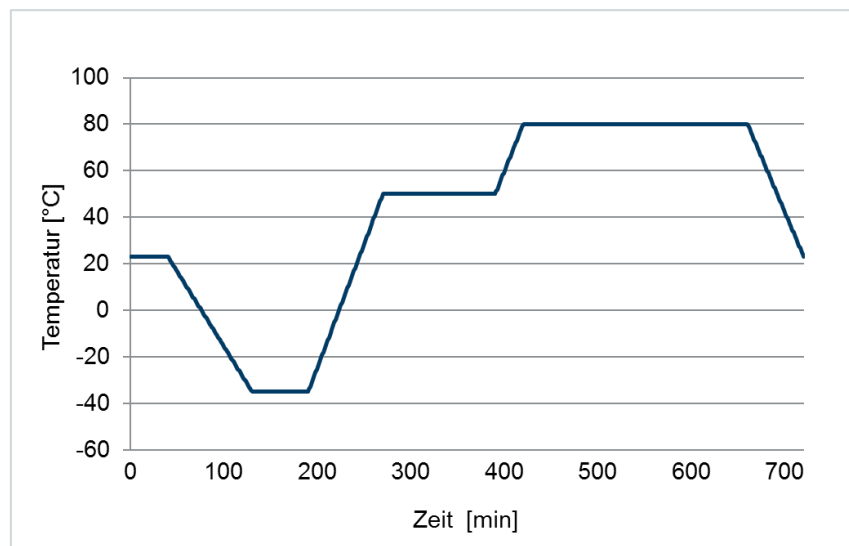


Abb. 58: Temperaturverlauf Klimawechseltest

Versuchsaufbau Schlittencrash

Für den Crashversuch des Kunststoffmontageträgers wird ein eigenes Anlagenkonzept entwickelt. Der Aufbau stellt eine Abwandlung des gesetzlich geforderten ODB-Versuchs dar und soll in erster Linie einem Abgleich des Versagensverhaltens der unterschiedlichen KUM unter dynamischer Lasteinwirkung dienen. Das Konzept orientiert sich an dem Dichtigkeitsversuch von Tanks. Dabei wird nicht das zu prüfende Bauteil sondern der Crashimpaktor beschleunigt, was zur Folge hat, dass das sog. ‚Hintergrundrauschen‘ der Sensoren während des Beschleunigungsvorgangs minimiert wird. Weiterhin ist der Bereich der Bauteilaufnahme von dem Anlagenrahmen getrennt, was ebenfalls eine genauere Sensoraufnahme begünstigt. Als Bauteilaufnahme wird ein Gestell aus Aluminiumprofilen angefertigt, auf dem das komplette Frontend ähnlich wie im PKW montiert werden kann. Die Aufnahmen des Bauteils und des Impaktors sind durch Lochplatten und eingelassene T-Nuten flexibel in ihrer Ausrichtung und Positionierung. Der schienengeführte Crasheschlitten wird mit dem Impaktor von einer Winde um eine 90°-Kurve aus der Horizontalen in die Vertikale gezogen und von dort über eine pneumatische Vorrichtung gelöst. Die potenzielle Energie des Schlittens wandelt sich in kinetische Energie um, sodass sich der Impaktor auf die Bauteilaufnahme zu bewegt. Bei einer Masse von 508 kg und einer Geschwindigkeit von ca. 6,95 m/s erzeugt der Schlitten eine Aufschlagenergie von ca. 9600 Joule. Für einen definierten Energieeintrag soll ein zusätzlicher Geschwindigkeitsregler in die Schienen integriert werden, der kurz vor Aufprall die Geschwindigkeit misst und ggf. noch einmal beschleunigt oder abbremst. Der Impaktor selbst besteht aus einem EPP-Schaum, der ein ähnliches Kompressionsverhalten wie eine Aluminiumwabenstruktur aufweist. Durch die Verformung des Impaktors wird ein Eintauchen über den Querträger des Frontends ermöglicht. Der Impuls wird über die triaxialen Beschleunigungssensoren aufgezeichnet und gibt Aufschluss darüber, ob ein Auslösen des Airbags stattgefunden hätte. Als zweiter Anhaltspunkt dient die optische Betrachtung der verstärkten Seitengurte nach dem Aufprall. Hier ist erkennbar, in wie weit der Sensor noch an die Struktur angebunden ist. Während des Versuchs löst der Schlitten über ein optisches Triggersignal die Beschleunigungssensoren und eine Hochgeschwindigkeitskamera gleichzeitig aus, die mit 5000 Bildern pro Sekunde den Versuch aufnimmt. Für einen besseren Kontrast bei den Aufnahmen wird der Bereich des Seitengurts mit unterschiedlichen Farben lackiert. Abb. 59 zeigt den schematischen Aufbau des Crashversuchs. Die Zeichnung entstammt dem zugehörigen eingereichten Patent, dem nähere Beschreibungen zum Anlagenaufbau zu entnehmen sind [92].

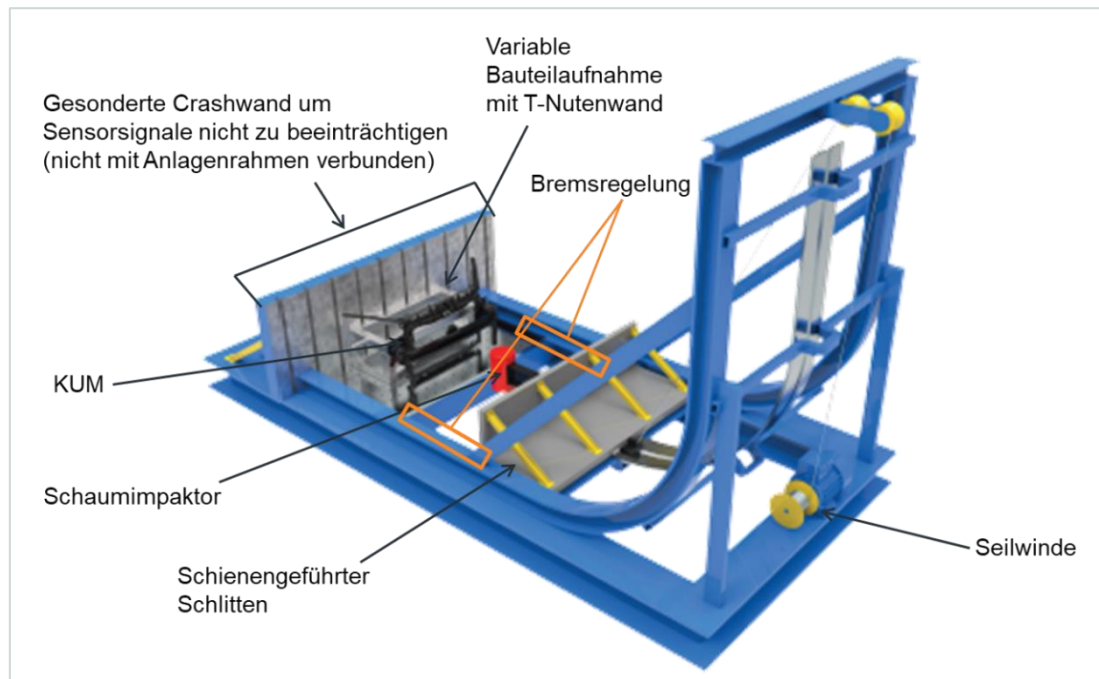


Abb. 59: Crashanlage mit entkoppelter Crashmesswand [59]

Die Auswertung der Sensorsignale sowie die optische Betrachtung der Versuchsteile in Vorversuchen zeigen, dass die Energie bei maximaler Geschwindigkeit zu hoch für eine aussagekräftige Beurteilung der Performance ist. Die Bauteile werden auf Grund der festen Positionierung vor der Crashwand soweit beschädigt, dass eine Untersuchung des Bruchverhaltens nicht möglich ist. Da im Rahmen dieser Arbeit eine Optimierung und die weitergehende Erprobung des Versuchsstands nicht möglich sind, muss auf eine kleine Crashbahn aus dem Seitenaufprallversuch zurückgegriffen werden. Das ZSB-Frontend wird in diesem Fall mit den Beschleunigungssensoren bestückt, auf einem Rollbock montiert und über diesen beschleunigt. Der Impaktor befindet sich vor der Crashwand und ist mit einem Triggersignal ausgestattet, der bei Erstkontakt den Beginn des Crashes signalisiert. Die Aufprallgeschwindigkeit wird für die Versuche um ca. die Hälfte auf 3,4 m/s reduziert. Analog zu den bisher in Serie eingesetzten Crashprüfungen wird in dem Crashversuch das ZSB und nicht der Impaktor beschleunigt. Demnach ist auch das Hintergrundrauschen während des Beschleunigungsvorgangs vorhanden. Dieses kann über eine Filter- und Glättfunktion abgeschwächt werden, die jedoch auch Einfluss auf die Absolutwerte der Beschleunigungspicks bei Aufprall und Rückstoß hat. Folglich ist nicht ein Vergleich der Absolutwerte, sondern lediglich ein A-B Vergleich der Verläufe der Beschleunigungskurven sinnvoll. Der A-B-Vergleich definiert die Vorgehensweise beim Vergleich zweier Komponenten oder Systeme unter identischen Bedingungen. Es ist eine übergeordnete Methodik, um einen unbeeinflussten und möglichst objektiven Abgleich zu ermöglichen.

5 Wissenschaftliche Betrachtung der Werkstoff-, Prozess- und Bauteilzusammenhänge

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Material-, Verbund- und Bauteilcharakterisierung dargestellt. Sie dienen als Diskussionsgrundlage und Kriterium für die spätere Bewertung der Serientauglichkeit.

5.1 Ergebnisse der Materialselektion und Eigenschaftscharakterisierung

Dieser Abschnitt behandelt die Materialselektion sowie die Ergebnisse der Eigenschaftscharakterisierung. Die Fasern werden zuerst in ihrem äußeren Erscheinungsbild charakterisiert. Zudem erfolgt eine Untersuchung der Eigenschaften als Filament und im UD-Verbund. Der Fokus liegt dabei auf der Faser-Matrix Interaktion und dem mechanischen Verhalten. Basierend auf den Ergebnissen wird die Basisfaser für die weiterführende Verarbeitung im Verstärkungsgitter ausgewählt. Die Verstärkungsgitter werden unter Beachtung der Länge der Kurzglasfasern im Spritzgussmaterial in verschiedenen Varianten hergestellt. In Abb. 60 ist der Beginn der allgemeinen systematischen Entwicklungsstruktur hervorgehoben. Die potenziellen Versagenszonen werden bereits in Kapitel 3.3 erörtert.

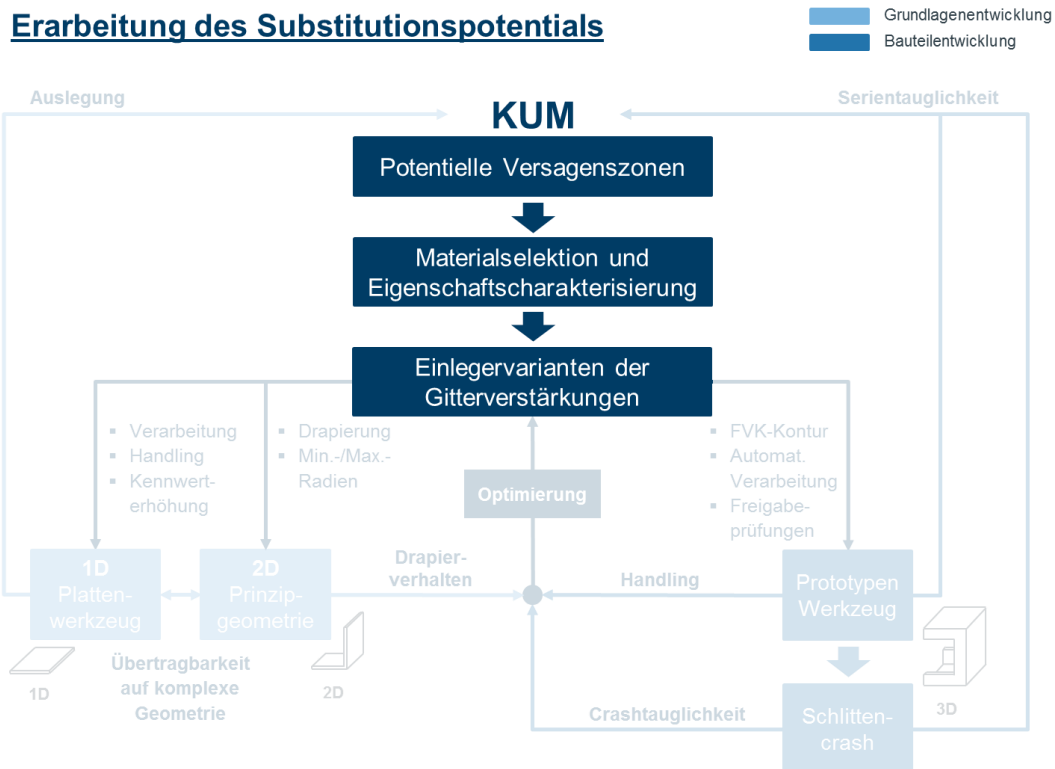


Abb. 60: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Definition der Versagenszonen, Materialselektion und Erstellung der Einlegervarianten

5.1.1 Charakterisierung der Faserbeschaffenheit

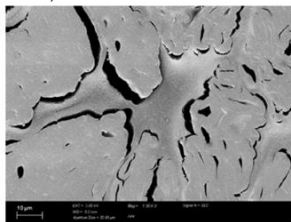
Die Beschaffenheit der Verstärkungsfasern wird über die Bestimmung der Faserdurchmesser und die mikroskopische Untersuchung der Oberfläche, speziell der Schlichteverteilung, charakterisiert. Ebenfalls werden der Schlichtegehalt und der Feuchtigkeitsgehalt bestimmt, um erste Anhaltspunkte auf die spätere Verarbeitung der Fasern im Spritzguss zu bekommen. Das Vorhandensein von Feuchtigkeit innerhalb der Schlichte kann die Haftung zur Spritzgussmatrix maßgeblich beeinträchtigen. In Tab. 17 sind die Faserdurchmesser aufgeführt. Ebenfalls zeigt die Tabelle den Schlichte- und Feuchtigkeitsgehalt der zu untersuchenden Fasern. Abb. 61 zeigt Oberflächenaufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskopie als Detail im Schnittbild und in der Übersicht für die Topographiebeurteilung.

Tab. 17: Faserdurchmesser bestimmt durch optische Lichtmikroskopie und Feuchtigkeits-/Schlichtegehalt [74]

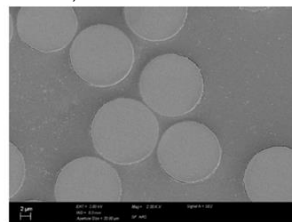
Fasertyp	Durchmesser [µm]			Feuchtigkeitsgehalt (*innerhalb Schlichte) [%]	Schlichtegehalt [%]
	D _{min}	D _f	D _{max}		
Jute	20,4	58,9 ± 17,6	105,0	6,2	-
Glas 1	9,8	13,5 ± 1,5	20,4	0,035*	1,0
Glas 2	12,8	15,8 ± 1,3	19,3	0,015*	0,6
Carbon 1	6,3	7,3 ± 0,3	8,0	0,015*	0,5
Carbon 2	5,3	7,0 ± 0,4	8,1	0,01*	1,4

Übersicht Schnittbild

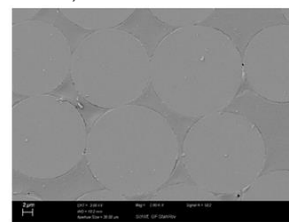
Jute, 2000x



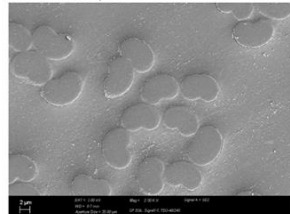
Glas 1, 2000x



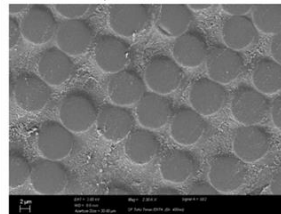
Glas 2, 2000x



Carbon 1, 2000x



Carbon 2, 2000x



Übersicht Topographiebeurteilung

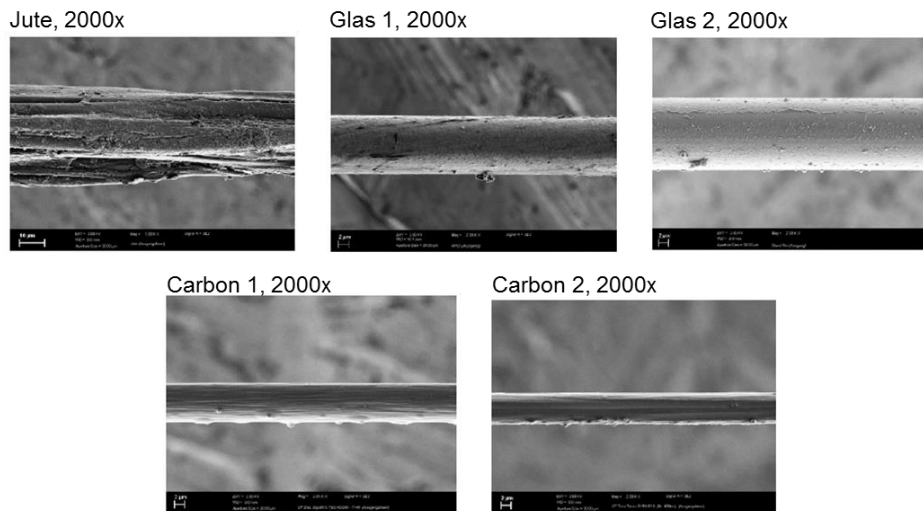


Abb. 61: Mikroskopaufnahmen Draufsicht; Vergrößerung 2000 x [74]

Die Faserdurchmesser D_f variieren zwischen 7,0 und 58,9 μm . Aufgrund der verschiedenen molekularen Aufbauten der Fasern sowie der allgemeinen Feststellung, dass bei kleiner werdendem Durchmesser auch die Anzahl der Fehlstellen in der Faser abnehmen, ist davon auszugehen, dass die Eigenschaften der Faser Carbon 2 am besten sind. Die Mikroskopaufnahmen im Schnitt zeigen die unterschiedlichen Beschaffenheiten der Faser. Die Jute besitzt einen porigen, beinahe lamellenartigen Aufbau, der auf Lufteinschlüsse und einen erhöhten Feuchtigkeitsgehalt innerhalb der Faser schließen lässt. Auch die äußere Struktur ist uneben und offen strukturiert. Der Aufbau der Jutefaser lässt vermuten, dass die Naturfaser ein gutes Tränkungs- und Imprägnierverhalten aufweist. Findet eine mechanische Verkrallung oder gar eine Faser-Matrix Interaktion statt, kann von einer guten Faser-Matrix Haftung ausgegangen werden, die innerhalb des Kapitels 5.1.2 bestätigt wird. Die Fasern Glas 1 und Glas 2 weisen einen typischen kreisrunden Querschnitt auf. In den Übersichtsbildern sind homogene Schlichteverteilungen mit punktuellen Anhäufungen zu erkennen. Die Carbonfasern 1 und 2 unterscheiden sich im Querschnitt (Carbon 1 nierenförmig, Carbon 2 rund), jedoch nicht im äußeren Erscheinungsbild. Der nierenförmige Querschnitt ist prozessbedingt und kann auf die Carbonisierung gepaart mit der auferlegten Abzugskraft zurückgeführt werden. Durch spezielle Prozessführung, wie bei dem Beispiel Carbonfaser 2, ist auch ein runder Faserquerschnitt einstellbar. Sie verfügen beide über eine rillenartige Außenstruktur mit tropfenförmig angereicherten Schlichtebereichen. Es ist zu erwarten, dass die einseitigen Anreicherungen bei einem Auszugsversuch eine Sollbruchstelle bilden.

Der Schlichtegehalt der Fasern variiert zwischen 0,5-1,4 %. In Abhängigkeit von der Art der Schlichte, kann der Gehalt einen Einfluss auf den Auszugsversuch im speziellen die Faser-Matrix Haftung haben. Die Untersuchung des Feuchtigkeitsgehalts bestätigt einen zu erwarten-

den Feuchtigkeitsanteil innerhalb der Schlichte, welcher bei der Charakterisierung der Faser-Matrix Interaktion (Kapitel 5.1.2) zu berücksichtigen ist. Im Vergleich mit der Jutefaser (6 % in der Faser) ist der Feuchtegehalt der Carbon- und Glasfasern in der Schlichte minimal. Der hohe Feuchtegehalt der Jute ist über die hygroskopischen Eigenschaften sowie die unterschiedlichen Möglichkeiten der Faser, Wasser zu binden, zu erklären. Die Beeinträchtigung der Faser-Matrix Interaktion sowie der mechanischen Eigenschaften und die Notwendigkeit einer Vortrocknung für den Verarbeitungsprozess innerhalb der Serie muss demzufolge näher untersucht werden. Für eine geeignete Verarbeitung von Jute kann zu diesem Zeitpunkt bereits eine Vortrocknung empfohlen werden (vgl. [54]), um Blasenbildung bzw. Brenner in der Matrix zu vermeiden.

5.1.2 Charakterisierung der Faser-Matrix Interaktion

Um eine erste Aussage über die Faser-Matrix Interaktion zu treffen, wird die Polarität der Fasern über eine Kontaktwinkelmessung anhand des Fortschreitwinkels untersucht. Anschließend erfolgt ein Faserauszug aus der Matrix (Single-Fibre Pull-Out), um die direkte Interaktion zwischen Faser und Matrix zu beurteilen. Die Auszugsflächen werden mittels REM-Aufnahmen bewertet. Tab. 18 zeigt die ermittelten Winkel der Fasern.

Tab. 18: Kontaktwinkelmessung ermittelt über den Fortschreitwinkel [74]

Fasertyp	Fortschreitwinkel [°]
Jute	79 ± 10
Glas 1	65 ± 6
Glas 2	72 ± 3
Carbon 1	84 ± 5
Carbon 2	83 ± 4

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei einer polaren Messflüssigkeit (in diesem Versuch H₂O) ein geringer Fortschreitwinkel ein Hinweis auf eine polare Faseroberfläche ist. Je kleiner der Fortschreitwinkel ist, desto hydrophiler ist die Faser.

Die gemessenen Durchschnittswerte variieren zwischen 65° und 84°. Die Oberflächen der Carbonfasern 1 und 2 unterscheiden sich dabei nur gering und sind mit 83-84° einer hydrophoben Oberfläche zuzuordnen. Die Glasfasern 1 und 2 liegen in einem Bereich zwischen 65° und 72°, wobei Glasfaser 1 hier das hydrophilste Verhalten zeigt. Dies entspricht den Erwartungen, da Glas 1 den höchsten Feuchtigkeitsanteil in der Schlichte aufweist. Bei Jute hingegen ist ein weit-aus hydrophileres Verhalten mit geringem Fortschreitwinkel zu erwarten. Der gemessene Wert von 79° lässt jedoch die Vermutung zu, dass die Naturfaser mit einer handelsüblichen mineralölbasierten Verarbeitungsschlichte versehen ist.

Die Ergebnisse des Single-Fibre Pull-Out sind in Tab. 19 zu sehen. Hier ist neben der tatsächlichen Einbettlänge die scheinbare und lokale Grenzflächenscherfestigkeit dargestellt. Um den Einfluss der Feuchtigkeit in der Schlichte und die damit verbundene Notwendigkeit einer Vortrocknung zu untersuchen, sind die Ergebnisse im vorgetrockneten und klimatisierten Zustand aufgeführt. Da bei den aufgeführten Ergebnissen eine große Streuung vorherrscht, können die Kennwerte lediglich als Tendenzen angesehen werden.

➤ **Einbettlänge**

Die Ist-Einbettlänge l_e wird über die aufgenommene Kraft-Verschiebungskurve ermittelt. Allgemein ist festzuhalten, dass die tatsächlichen Einbettlängen aller Fasern in einem ähnlichen Bereich liegen (154-209 μm). Ausnahme bilden die Glasfasern mit $>640 \mu\text{m}$ Einbettlänge. Diese erhöhten Einbettlängen sind auf Grund der glatten Faseroberflächen notwendig, um eine Kraftaufnahme innerhalb des messbaren Bereichs zu ermöglichen.

➤ **Scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit**

Die scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit τ_{app} beinhaltet die Grenzflächenadhäsion, -reibung und thermische Spannung beim Pull-Out. Die gemessenen Werte variieren zwischen 5,6 MPa (Glas 1) und 18,0 MPa (Carbon 1) für die klimatisierten Fasern. Die vorgetrockneten Fasern zeigen niedrigere Werte und liegen zwischen 4,5 MPa (Glas 1) und 15,5 MPa (Carbon 1). Es kann demnach festgehalten werden, dass tendenziell eine höhere Grenzflächenscherfestigkeit bei Carbon- und Glasfasern im klimatisierten Zustand vorliegt. Dabei beschreibt FREUDENBERG in [45], dass freie oder gebundene OH-Gruppen für die chemische Anbindung von Haftmittel zur Verbesserung der Verbundeigenschaften beitragen können. Ein gegenteiliges Verhalten zeigt die Jutefaser, die durch Vortrocknung eine bessere Scherfestigkeit erzielt. Ein möglicher Grund dafür sind freie reaktive Gruppen an der Faseroberfläche, die nach dem Trocknungsprozess (Abspaltung von Wasser) eine Bindung zur Matrix eingehen. Ein besonderes Augenmerk ist auf τ_{app} der Fasern Glas 1 und Glas 2 zu legen. Im klimatisierten Zustand erreicht Glas 2 eine beinahe doppelt so hohe scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit, wie Glas 1. Dieses Ergebnis korreliert mit dem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt in der Schlichte der Glasfaser 1 sowie dem gemessenen Kontaktwinkel und zeigt, dass die Haftung in Abhängigkeit zu der Hydrophilie der Schlichte steht. Weiterhin unterstreicht es die Eignung der Schlichte auf Glasfaser 2, welche für den Einsatz in Polypropylen prädestiniert ist. Die unterschiedlichen Schichten der Carbonfasern weisen indes nahezu gleiche Werte für τ_{app} auf, sodass eine Abhängigkeit hier vorerst nicht bestätigt werden kann.

➤ Lokale Grenzflächenscherfestigkeit

Die lokale Grenzflächenscherfestigkeit τ_d ist unbeeinflusst von Grenzflächeneffekten. Die Werte der klimatisierten Fasern variieren zwischen 7,4 MPa (Jute) und 33,0 MPa (Glas 2), während die vorgetrockneten Fasern Werte zwischen 15,6 MPa (Carbon 2) und 26,3 MPa (Glas 2) aufweisen. Es kann demnach auch hier von einer tendenziell erhöhten lokalen Grenzflächenscherfestigkeit im klimatisierten Zustand für Glas- und Carbonfasern ausgegangen werden. Wird der klimatisierte und vorgetrocknete Wert τ_d von Glasfaser 1 und Glasfaser 2 untereinander verglichen, zeigt sich eine Differenz von >10 MPa. Die in vorigem Abschnitt beschriebene Abhängigkeit wird bestätigt und durch nachfolgende Mikroskopaufnahmen der Auszugsfläche und durch gleichmäßige und erhöhte Kraft-Weg Kurven untermauert. Dem gegenüber weisen Carbon 1 und Carbon 2 nur marginale Abweichungen auf. Für die Carbonfasern kann demzufolge festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Schichten keinen Einfluss auf das Pull-Out Ergebnis haben. Die Jute verhält sich, wie zuvor beschrieben, gegensätzlich und zeigt im vorgetrockneten Zustand mit 15,9 MPa eine verdoppelte lokale Grenzflächenscherfestigkeit.

Tab. 19: Scheinbare und lokale Grenzflächenscherfestigkeit ermittelt über Single-Fibre Pull-Out [74]

Fasertyp		Einbettlänge Ist [μm]	Scheinbare Grenzflächen- scherfestigkeit [MPa]	Lokale Grenzflächen- scherfestigkeit [MPa]
Jute	klimatisiert	154 \pm 22	12,1 \pm 5	7,4 \pm 3,4
	vorgetrocknet	166 \pm 24	14,4 \pm 5	15,9 \pm 3,4
Glas 1	klimatisiert	677 \pm 36	5,6 \pm 1	22,1 \pm 6,7
	vorgetrocknet	648 \pm 57	4,5 \pm 0,5	16,9 \pm 3,8
Glas 2	klimatisiert	690 \pm 46	9,4 \pm 2	33 \pm 6,5
	vorgetrocknet	674 \pm 77	7,9 \pm 2	26,3 \pm 8,6
Carbon 1	klimatisiert	188 \pm 39	18 \pm 6,9	18,7 \pm 9,1
	vorgetrocknet	200 \pm 26	15,5 \pm 5,9	16,4 \pm 6,6
Carbon 2	klimatisiert	209 \pm 29	17,6 \pm 6,6	18,8 \pm 8,9
	vorgetrocknet	207 \pm 25	12,6 \pm 7,3	15,6 \pm 8,9

Abb. 62 zeigt beispielhaft den Verlauf der Kraft-Weg Kurven für Jute (getrocknet) und Carbon 1 (klimatisiert). Dabei sei erwähnt, dass die Diagramme zwar die gleichen Einheiten, jedoch in unterschiedlichen Skalierungen aufweisen. Die aufgebrachte Kraft bis F_{max} ist die Kraft, die für das Lösen des Verbunds notwendig ist. Der darauffolgende Kraftabfall bis auf ein Minimum beschreibt die Kraft, die für das Ausziehen benötigt wird. Anhand von Abb. 62 ist zu erkennen, dass bei Jute die maximale Kraft F_{max} bereits nach kurzem Auszugsweg erreicht ist. Der darauffolgende, verzögerte Kraftabfall ist Anzeichen für die zuvor beschriebene raue Oberfläche der

Jute und den damit zusammenhängendem hohen Reibanteil beim Auszug. Demzufolge ist eine veränderte Oberflächenstruktur der Jutefaser nach Auszug zu erwarten. Im Gegensatz dazu zeigt der Kurvenverlauf der Faser Carbon 1 einen verzögerten Anstieg bis zum Erreichen von F_{\max} und eine darauffolgend kurze Auszugsphase. Dies ist ein Zeichen von geringer Reibung während des Auszugs und einer mäßigen Faser-Matrix Interaktion.

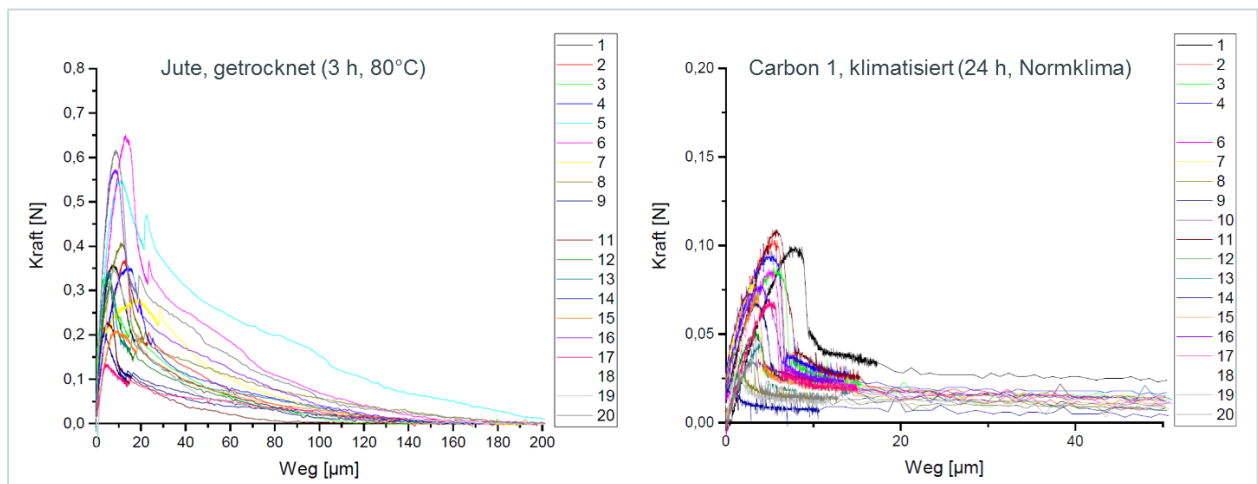


Abb. 62: Beispiele für Kraft-Weg-Diagramme aus Single-Fibre Pull-Out Versuch – links Jute, rechts Carbon 1 [74]

In Abb. 63 sind Beispielaufnahmen der Faserauszugsflächen zu sehen. Die Jute scheint nach dem Auszug eine glattere Oberfläche zu haben, was in Bezug auf die Kraft-Weg Kurven einen hohen Reibanteil einhergehend mit einer Oberflächenveränderung widerspiegelt. Bei der Faser Glas 1 sind punktuelle Ablagerungen zu sehen, die deutlich zu Tage treten. Es ist zu erwarten, dass die Ablagerungen vor dem Versuch von der Schlichte überdeckt sind und nach Durchführung an der Oberfläche besser sichtbar werden. Demzufolge kann angenommen werden, dass der Riss zwischen Matrix und Schlichte verläuft. Die Glasfaser 2 zeigt eine gute Faser-Matrix Haftung und erreicht die höchsten Grenzflächenscherfestigkeiten. Bestätigt werden die Werte über vorhandene Matrixrückstände auf der Faseroberfläche (Schlieren). Auch der Kraft-Weg Verlauf bis F_{\max} zeigt innerhalb der ersten 50 μm einen prägnanten Kraftanstieg, der für das Lösen des Verbunds notwendig ist (siehe Anhang). Die Aufnahmen der Carbonfasern 1 und 2 weisen kaum Veränderungen zum Ausgangszustand auf. Teilweise erscheint die Rillenstruktur deutlicher; anhaftende Matrixbestandteile sind nicht sichtbar. Dies deutet auf eine geringe Faser-Matrix Haftung hin und spiegelt sich in dem geringen Reibanteil innerhalb der Kraft-Weg Kurven wieder. Es kann festgehalten werden, dass die vorhandene Feuchtigkeit im klimatisierten Zustand bei Carbon- und Glasfasern keine negative Auswirkung auf die Faser-Matrix Interaktion hat.

Übersicht Topographiebeurteilung nach Single-Fibre Pull-Out

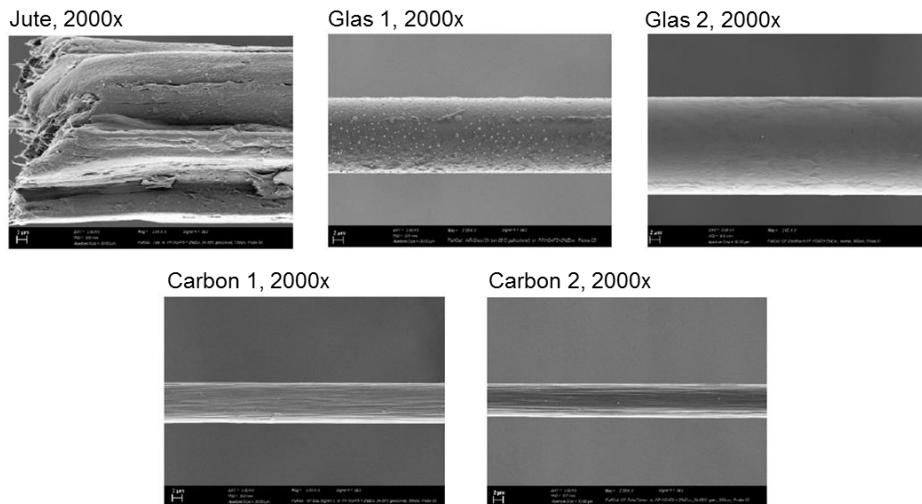


Abb. 63: Mikroskopaufnahmen nach Single-Fibre Pull-Out, Vergrößerung 2000 x [74]

5.1.3 Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden anhand der Einzelfaserzugfestigkeit charakterisiert. Zusätzlich werden die Fasern zu einem UD-Verbund verarbeitet und auf Zugfestigkeit, Schlagzähigkeit und Druckscherung untersucht. Hierdurch wird das maximal zu erreichende Eigenschaftspotential der Fasern bei unidirektionaler Ausrichtung definiert.

Einzelfaserzugversuch

Tab. 20 zeigt die Ergebnisse der Einzelfaserzugfestigkeiten sowie den ersten und zweiten Modul der Fasern. Der Elastizitätsmodul wird zwischen 0,05-0,5 % und 0,5-1,0 % Dehnung gemessen. Erfahrungswerte haben gezeigt, dass Fasern mit sprödem Verhalten den Messbereich zwischen 0,5-1,0 % nicht erreichen und somit kein E-Modul gemessen werden kann. Um dies auszuschließen wird der E-Modul in zwei Bereichen gemessen. Aus Sicht der Messwerte treten auch innerhalb dieser Untersuchung hohe Streuungen auf, sodass die Kennwerte lediglich als Tendenzen zu betrachten sind. Um die Oberflächenqualität (statistische Verteilung von Rissen und Fehlstellen) der Fasern im Einzelfaserzugversuch zu beurteilen, wird zusätzlich die Weibull-Verteilungsfunktion herangezogen. Sie beschreibt die statistische Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Faserbruchs. Die Weibull-Verteilung ist eine häufig verwendete Darstellungsweise für Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen. Sie wird über die charakteristische Bruchspannung σ_0 , die Steilheit (Weibull-Modul) m und die Grenzbruchspannung σ_u definiert. Ist die Grenzbruchspannung $\sigma_u = 0$, beschränkt sich die Verteilung auf die zuvor erwähnten Parameter. Der Parameter m ist ein Maß für die Streuung der Festigkeitswerte. Ist der Weibull-Modul unendlich groß, versagen die Proben bei exakt gleicher Spannung [93]. Die logarithmierten Ver-

teilungsfunktionen sind in Abb. 64 aufgeführt. Dabei zeigt die Abszisse die ermittelte Bruchspannung und die Ordinate die zugehörige Bruchwahrscheinlichkeit. Zur Untersuchung des Trocknungseinflusses auf die Oberfläche, werden hier die Verteilungen getrockneter und klimatisierter Fasern aufgezeigt.

Tab. 20: Einzelfaserzugfestigkeit und 1./2. Modul ermittelt über Einzelfaserzugversuch [74]

Fasertyp		Festigkeit [MPa]	1. Modul (0,05-0,5 %) [GPa]	2. Modul (0,5-1,0 %) [GPa]
Jute	klimatisiert	622 ± 208	32 ± 14	37 ± 14
	vorgetrocknet	569 ± 190	27 ± 11	33 ± 11
Glas 1	klimatisiert	1940 ± 382	73 ± 2	72 ± 2
	vorgetrocknet	2278 ± 250	72 ± 1	72 ± 1
Glas 2	klimatisiert	2861 ± 446	76 ± 1	75 ± 1
	vorgetrocknet	2476 ± 412	75 ± 1	74 ± 1
Carbon 1	klimatisiert	3660 ± 617	207 ± 17	224 ± 19
	vorgetrocknet	3418 ± 507	210 ± 10	225 ± 11
Carbon 2	klimatisiert	3169 ± 669	211 ± 5	226 ± 5
	vorgetrocknet	3056 ± 581	216 ± 7	230 ± 7

➤ Jutefaser

Es ist zu erkennen, dass die Jutefaser sowohl im getrockneten (569 MPa) als auch im klimatisierten (622 MPa) Zustand eine geringe Festigkeit aufweist. Die Werte unterscheiden sich um etwa 53 MPa und zeigen somit eine Differenz von ca. 10 % (Tab. 20). Auch der 1. und 2. Modul ist im Vergleich zu den anderen Fasern am niedrigsten (27-37 MPa). In der Weibull-Darstellung weißt die Jutefaser einen flachen Anstieg sowie eine relativ große Streuung der Messwerte auf (Abb. 61). Dies ist Zeichen für den inhomogenen Faseraufbau. Ein relevanter Unterschied des Kurvenverlaufs zwischen klimatisierter und vorgetrockneter Jute ist nicht zu erkennen. Lediglich die Streuung der Werte ist bei den vorgetrockneten Fasern geringer. Der Grund hierfür könnte auf den einheitlichen Trocknungsgrad der Proben zurückzuführen sein.

➤ Glasfaser

Glasfaser 1 zeigt eine hohe Differenz (~16 %) der Einzelfaserzugfestigkeit zwischen klimatisiertem (1940 MPa) und getrocknetem (2287 MPa) Zustand. Die Module hingegen unterscheiden sich nur marginal (72-73 GPa). Es fällt auf, dass Glas 1 als einzige Faser eine höhere Zugfestigkeit im getrockneten Zustand aufweist. Dieses Verhalten unterstreicht die zuvor beschriebene Hypothese und zeigt, dass neben der Haftung auch die Einzelfaserzugfestigkeit durch Feuchtigkeit beeinträchtigt wird. FREUDENBERG [45] und FLEMMING ET AL. [38] beschreiben die Reduzie-

rung der Zugfestigkeit durch Feuchtigkeit. Demnach können OH-Gruppen in die Glasstruktur eingebaut werden und durch Reaktion an der Faseroberfläche einen Festigkeitsverlust zur Folge haben. Ein genaueres Bild ergibt sich dazu im Weibull-Diagramm. Die vorgetrockneten Glasfasern besitzen einen doppelt so hohen Weibull-Modul wie die klimatisierten Fasern, was auf eine gleichmäßigere Oberfläche und ein einheitliches Versagensbild hinweist. Die Weibull-Kennwerte bestätigen hiermit die Ergebnisse aus der angeführten Literatur, dass durch Feuchtigkeit die Oberfläche der Fasern und somit die mechanischen Kennwerte und das Versagensverhalten beeinträchtigt werden.

Im Vergleich dazu besitzt die klimatisierte Glasfaser 2 eine Festigkeit von 2861 MPa bei Modulwerten von ~ 75 GPa. Die Festigkeitswerte der getrockneten Fasern liegen niedriger bei etwa 2476 MPa. Es ist zu erkennen, dass bei Glas 2 eine eindeutige Verminderung der Zugfestigkeit durch Vortrocknung vorliegt, welche sich tendenziell auch schon bei dem Pull-Out Versuch gezeigt hat. Der generelle Unterschied in den Festigkeiten zwischen Glas 1 und Glas 2 liegt ebenfalls in dem strukturellen Aufbau der Fasern (Glas 1 – AR-Faser, Glas 2 – E-Faser) begründet. Über das Weibull-Diagramm wird gezeigt, dass das Weibull-Modul der Faser Glas 2 keine nennenswerte Erhöhung nach Trocknung erfährt. Die mechanischen Eigenschaften werden demnach durch den vorgeschalteten Prozess nicht beeinflusst. Die Steigung der Ausgleichsgeraden kennzeichnet zudem eine homogene Oberfläche, wie sie auch über die REM-Aufnahme bestätigt wird.

➤ Carbonfaser

Grundlegend ist festzuhalten, dass die hohe Streuung der ermittelten Einzelfaserzugfestigkeiten auf die Inhomogenität der einzelnen Carbonfasern zurückzuführen ist. Weiterhin ausschlaggebend ist die gewählte Einspannlänge. Diesbezüglich zeigen FLEMMING ET AL. in [38] dass die Festigkeit der Einzelfaser bei abnehmender Einspannlänge steigt. Die Streuung wird ebenfalls reduziert. Die klimatisierte Carbonfaser 1 zeigt mit 3660 MPa den höchsten gemessenen Festigkeitswert. Die Kennwerte selbiger vorgetrockneter Faser weichen um $\sim 7\%$ ab und liegen bei 3418 MPa. Die Zugmodule 1 und 2 der Carbonfaser 1 zeigen nur marginale Unterschiede untereinander. Der 1. Modul liegt bei ~ 209 GPa und der 2. Modul bei ~ 225 GPa. Bei Betrachtung der Weibull-Verteilung ist zu erkennen, dass ein geringfügig erhöhter Weibull-Modul und demnach eine geringere Streuung bei den getrockneten Fasern vorliegen. Ebenfalls sinkt die Bruchwahrscheinlichkeit, was ein möglicher Hinweis auf eine Verfestigung der Schlichte durch den Trocknungsvorgang ist. Um diese These zu bestätigen sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Die klimatisierte Carbonfaser 2 erreicht eine Zugfestigkeit von 3169 MPa und liegt somit 4% über der Festigkeit von Carbon 2 (3056 MPa) im vorgetrockneten Zustand. Diese geringe Ab-

weichung spiegelt sich auch in der Weibull-Auswertung wieder. Die Weibull-Module zeigen lediglich marginale Unterschiede zwischen getrocknetem und klimatisiertem Zustand auf. Dieses Ergebnis korreliert mit dem Verhalten der Faser-Matrix Interaktion aus vorigem Kapitel. Demnach ist eine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von dem Feuchtegehalt der Faser Carbon 2 auszuschließen. Die Zugmodule 1 und 2 ähneln den Modulen der Carbonfaser 1.

Mit Ausnahme der Glasfaser 1 weisen alle Fasern eine höhere Zugfestigkeit im klimatisierten Zustand auf. Die Streuung der gemessenen Zugfestigkeiten wird durch den Trocknungsprozess bei den Fasern Glas 1 und Carbon 1 maßgeblich reduziert, was die Notwendigkeit einer Vortrocknung vorerst nur für Glas 2 und Carbon 2 ausschließt. Es liegen keine bzw. nur marginale Beeinträchtigungen der Faser-Matrix Interaktion durch Feuchtigkeit vor. Ebenfalls zeigt sich nur eine geringfügige Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften (Einzelfaserzugfestigkeit) durch einen Trocknungsprozess. Die Streuung der Einzelwerte wird minimal reduziert, sodass der Energieaufwand für die Vortrocknung keinen nachhaltigen Mehrwert darstellt.

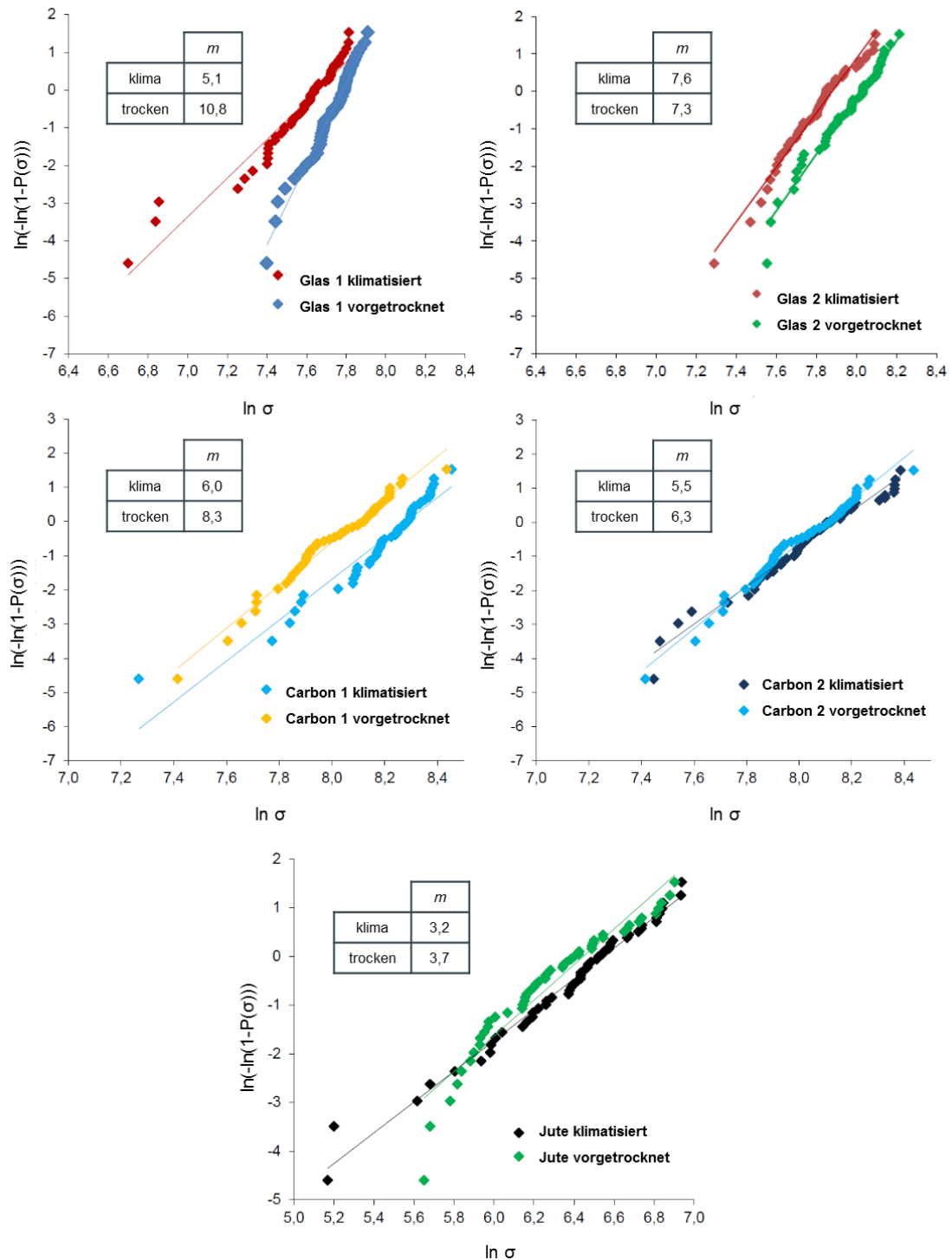


Abb. 64: Weibull-Diagramme der Einzelfasern [74]

Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des UD-Verbundes über Zugversuch, Schlagzähigkeit und Druckscherung

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 21) sind die Quer- und Längszugfestigkeiten der Verstärkungsfasern im UD-Verbund dargestellt. Der Faservolumengehalt entspricht ~50 vol.%, wie er häufig in kommerziellen Leichtbauanwendungen zu finden ist. Wie zu erwarten, ist die Quersugfestigkeit grundsätzlich geringer als die Längszugfestigkeit. Dabei ist bemerkenswert, dass die

Jutefaser (14,4 MPa) verglichen mit den übrigen Fasern eine hohe Querkzugfestigkeit besitzt. Dieses Verhalten ist auf die raue Oberfläche der Faser zurückzuführen, die auch quer für eine gute Verkrallung mit der Matrix sorgt. Die Längszugfestigkeit der Jute fällt im Vergleich (173 MPa) wiederum gering aus. Weiterhin ist anhand der Werte der Querkzugfestigkeit der Einfluss der unterschiedlichen Schichten zu erkennen. Die Querkzugfestigkeiten bei Fasern mit thermoplastkompatibler Schlichte sind bei Glas um ein Vielfaches (Faktor 14), bei Carbon um mehr als doppelt so hoch. Bei der Längszugfestigkeit ist eine ähnliche, jedoch nicht so stark ausgeprägte Tendenz der Werte in Bezug auf die Schlichteabhängigkeit zu erkennen. Dabei erreicht die Carbonfaser 1 mit ~787 MPa die höchste gemessene Festigkeit. Die Werte der Jutefaser sind, wie bereits zuvor erwähnt, niedrig.

Tab. 21: Quer- und Längszugfestigkeiten von UD-Verbunden mit unterschiedlichen Verstärkungsfasern [74]

Fasertyp	Faservolumengehalt [vol.%]	Querkzugfestigkeit [MPa]	Längszugfestigkeit [MPa]
Jute	49,7	14,4 ± 0,4	173,0 ± 11,8
Glas 1	49,4	1,2 ± 0,1	488,4 ± 35,9
Glas 2	49,8	17,4 ± 0,8	614,2 ± 66,4
Carbon 1	49,3	19,1 ± 0,6	787,3 ± 59,4
Carbon 2	46	7,5 ± 1,1	754,6 ± 29,7

Die Schlagzähigkeit wird flatwise bei RT geprüft. In Abb. 65 sind die ermittelten Werte in einem Balkendiagramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Jute die geringste Schlagzähigkeit mit 25,56 kJ/m² besitzt, was auf die Struktur und den inhomogenen Aufbau der Faser zurückzuführen ist. Im Gegenzug dazu zeigt Glas 2 die höchste gemessene Schlagzähigkeit mit 373,92 kJ/m². Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen und spiegelt die erhöhte Zugfestigkeit in der Einzelfaser wieder. Neben den Eigenschaften der Faser, trägt auch die gute Faser-Matrix Interaktion (siehe Pull-Out Versuch) zu einer erhöhten Schlagzähigkeit bei. Dabei macht die aufzubringende Arbeit entlang der Grenzfläche bei Schlagbelastung einen nennenswerten Anteil an der gesamten Arbeit aus. Die Carbonfasern 1 und 2 sowie die Faser Glas 1 zeigen nahezu identische Werte mit ~140 kJ/m². Diese Werte spiegeln das spröde Verhalten von Carbon bei Schlagbelastung wieder. Ein Einfluss der Schlichte ist bei den Carbonfasern nicht zu erkennen. Ebenso zeigt der Wert für Glas 1 den Einfluss unterschiedlicher Faserbeschaffenheit. Das AR-Glas verhält sich in diesem Zusammenhang wesentlich spröder, was sich u.a. in Mikrorissbildung widerspiegelt.

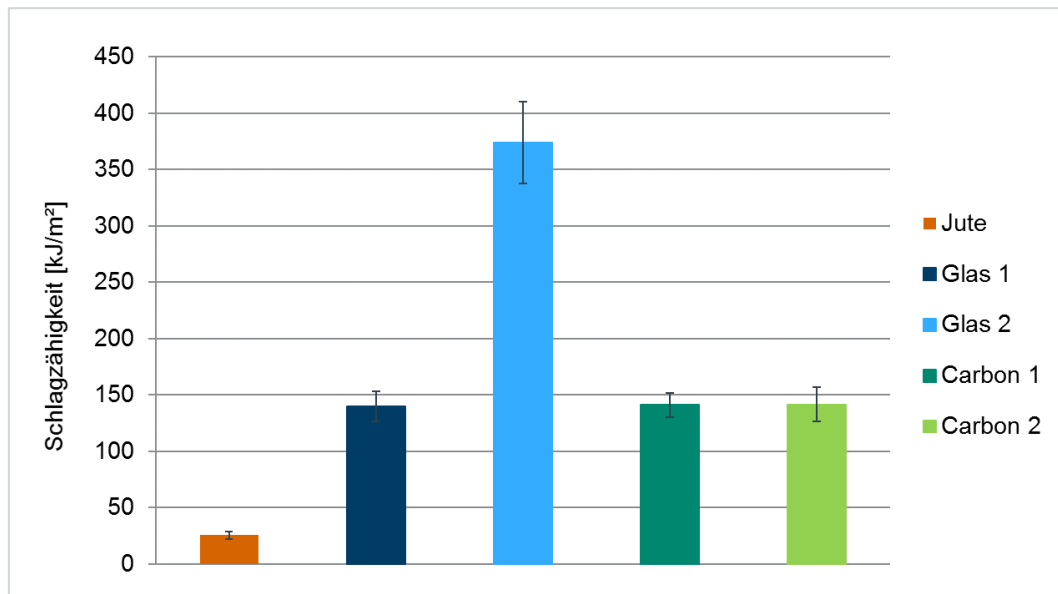


Abb. 65: Schlagzähigkeit im UD-Verbund mit unterschiedlichen Verstärkungsfasern, modifiziert [74]

Die gemessene Druckscherung ist in Tab. 22 aufgeführt. Dabei ist zu erkennen, dass die Faser Glas 1 den geringsten Wert aufweist ($6,50 \text{ N/mm}^2$). Die Faser Glas 2 besitzt mit $27,71 \text{ N/mm}^2$ vergleichsweise hohe Druckschereigenschaften. Dies entspricht den Erwartungen, da die Faser Glas 2 einen höheren Durchmesser aufweist. Der Durchmesser bestimmt maßgeblich das Mikroklicken entlang der Faser, was ein Druckversagen initiiert. Das gleiche Versagensverhalten beschreiben FLEMMING ET AL. in [38] bei Borfasern (D_f 100-140 μm). Ebenfalls untermauern die gemessenen Werte die Ergebnisse des Pull-Out Versuchs und bestätigen eine gute Faser-Matrix Interaktion. Der Einfluss der Grenzfläche und des Faseraufbaus spiegelt sich auch bei den Ergebnissen der Carbonfasern wieder. Obwohl der Faserdurchmesser mit durchschnittlich $7,1 \mu\text{m}$ gering ist, zeigen die Carbonfasern hohe Druckschereigenschaften, die auf die 2D-Struktur und die Parakristallinität von Carbon zurückzuführen sind. Die Faser Carbon 1 mit thermoplastfreundlicher Schlichte zeigt zusätzlich etwa doppelt so hohe Werte ($37,51 \text{ N/mm}^2$) wie die Carbonfaser 2 ($20,17 \text{ N/mm}^2$), was die Abhängigkeit der Druckschereigenschaften zur Faser-Matrix Interaktion unterstreicht. Die Jutefaser erreicht erwartungsgemäß hohe Kennwerte, welche in direktem Zusammenhang mit dem hohen Faserdurchmesser ($\sim 58 \mu\text{m}$) zu sehen sind. Zusätzlich sorgen die Oberflächenrauhigkeit und abstehende Fasern für eine Verkrallung und eine dementsprechend hohe Druckscherung.

Tab. 22: Druckscherung von UD-Verbunden mit unterschiedlichen Verstärkungsfasern [74]

Fasertyp	Druckscherung [N/mm ²]
Jute	30,36 ± 1,16
Glas 1	6,50 ± 0,52
Glas 2	27,71 ± 0,59
Carbon 1	37,51 ± 1,93
Carbon 2	20,17 ± 0,62

5.1.4 Beurteilung des Nutzungspotentials der Verstärkungsfasern

Die Verstärkungsfasern unterscheiden sich nicht nur in der äußeren Form und der Dichte, sondern auch in den mechanischen Eigenschaften und dem Preis. Eine ganzheitliche Betrachtung der Performance sowie eine Abwägung der Kosten/Nutzen Faktoren ist für die Auswahl der passenden Verstärkungsfasern unabdingbar.

➤ Jutefaser

Die Jutefaser verfügt über eine naturbelassene, unstrukturierte Topographie, die neben der Faser-Matrix Interaktion an den Grenzflächen zusätzlich für eine mechanische Verkrallung sorgt. Diese Verkrallung spiegelt sich in den Auszugskurven (Verlauf nach F_{\max}) des Pull-Out Versuchs wieder. Bei Betrachtung von τ_d (Grenzflächenscherfestigkeit ohne Grenzflächeneffekte) zeigt sich indes, dass die direkte Interaktion zu dem unpolaren PP nur mäßig ist. Die Wilhelmy-Methode bestätigt eine hydrophobe und somit unpolare Faseroberfläche. Da die Naturfasern von sich aus polar sind, deutet dies auf eine mineralölbasierte Verarbeitungsschicht hin. Die Jutefaser weist zudem die niedrigsten Zugfestigkeiten im Einzelfaserzugversuch auf. Die anisotrope Faseroberfläche führt dabei zu einer erhöhten Streuung der mechanischen Kennwerte. Bezüglich der Verbundeigenschaften zeigt die Jutefaser auf Grund ihrer inhomogenen Oberflächenstruktur und der abstehenden Fasern eine hohe Querkzugfestigkeit und eine hohe Druckscherung. Die Längszugfestigkeit ist im Vergleich zu den anderen Fasern gering. Erwartungsgemäß fällt die Schlagzähigkeit ebenfalls gering aus.

Der Vergleich der Kennwerte im trockenen und klimatisierten Zustand zeigt, dass sowohl die Faser-Matrix Interaktion als auch die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit zu dem vorhandenen Feuchtegehalt stehen. Demnach erreicht die Naturfaser ihre beste Performance im vorgetrockneten Zustand, welcher auch für eine Verarbeitung im Serienprozess zu empfehlen ist.

➤ Glasfaser

Mit Hilfe der REM-Aufnahmen sind geringfügige Strukturen an den Glasfaseroberflächen zu erkennen, die Rückschlüsse auf die Beschichtungen der Fasern zulassen. Die Schicht der Glasfaser 1 zeigt punktuelle Anhäufungen, die von einer zusätzlichen Beschichtung überdeckt zu sein

scheinen. Dies wird durch die REM-Aufnahmen nach dem Pull-Out Versuch bestätigt. Die Aufnahmen zeigen die punktuellen Anhäufungen nun deutlich an der Oberfläche, lassen jedoch keinen Rückschluss auf Matrixrückstände durch eine Faser-Matrix Interaktion zu. Die unzureichende Interaktion wird durch die geringen Werte der Grenzflächenscherfestigkeit bestätigt und ist auf Grund des erhöhten Feuchtigkeitsgehalts in der Schlichte sowie der Eignung für duroplastische Matrices erwartungsgemäß. Weiterhin unterstreicht die geringe Querkzugfestigkeit im Verbund die ungenügende Interaktion zwischen Faser und Matrix. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften zeigt Glas 1 die geringsten Einzelfaserzugfestigkeiten nach Jute. Dabei werden im Vergleich zwischen klimatisiertem und vorgetrocknetem Zustand die höheren Zugfestigkeiten tendenziell nach Vortrocknung erreicht. Die Weibullverteilung mit einem erhöhten Weibull-Modul im vorgetrockneten Zustand unterstreicht die zuvor genannte Tendenz. Bestätigt werden die genannten Ergebnisse durch Untersuchungen von FREUDENBERG in [45]. Die Messung der Verbundeigenschaften zeigt den Erwartungen entsprechend eine durchgängig ungenügende Performance über die Belastungsarten (Zug, Schlagbiege, Druckscherung) hinweg. Dabei ist der strukturelle Aufbau der Faser (AR-Glas) als auch die Eignung der Schlicht als Begründung anzuführen.

Die Schlichte der Glasfaser 2 ist auf der Oberfläche gleichmäßig und flächig verteilt. Nach dem Fibre Pull-Out ist diese abgetragen und Rückstände der Matrix sind in Form von Schlieren auf der Faseroberfläche zu erkennen. Diese Rückstände sind Hinweis auf eine Faser-Matrix Interaktion und verifizieren die Eignung der Schlichte für Thermoplasten. Ebenfalls bestätigt sich eine gute Interaktion durch erhöhte Grenzflächenscherfestigkeiten sowie die Werte der Querkzug- und Druckscherfestigkeit im Verbund. Der Durchmesser der Faser Glas 2 ist im Mittel um $2,3\ \mu\text{m}$ größer, als der Durchmesser der Faser Glas 1. Dieser Unterschied spiegelt sich in den erhöhten Werten der Druck- und Schlageigenschaften im Verbund wieder. Die Kennwerte zeigen, dass das Mikroklicken entlang der Faser in direktem Zusammenhang mit deren Durchmesser steht [38]. Bezogen auf die mechanischen Eigenschaften der Einzelfasern zeigt Glas 2 sowohl in der Weibullverteilung als auch mit den erhöhten Werten der Einzelfaserzugfestigkeiten, dass keine Abhängigkeit von einem Vortrocknungsprozess vorliegt. Die UD-Eigenschaften im Verbund zeigen neben der eindeutigen Abhängigkeit der thermoplastfreundlichen Beschichtung auch den erwähnten Einfluss des hohen Faserdurchmessers bei Schlagbiegebelastung.

➤ **Carbonfaser**

Die Topographie der Carbonfasern zeigt in beiden Fällen rillenartige Außenstrukturen und tropfenförmige Anhäufungen der Schlichten. Dabei unterscheidet sich der prozentuale Schlichtegehalt zwischen 0,5 % (Carbon 1) und 1,4 % (Carbon 2). Die Kontaktwinkel beider Fasern sind na-

hezu identisch (83-84°) und zeigen hydrophobe Faseroberflächen. Für eine duroplastische Beschichtung sind jedoch kleinere Kontakwinkeln zu erwarten, die eine hydrophile Oberfläche und somit ein reaktives Verhalten nachweisen (vgl. [45] [94]). Die unterschiedlichen Kompatibilitäten zeigen beim Single-Fibre Pull-Out nur einen geringfügigen Einfluss auf die Faser-Matrix Interaktion. Im Verbund tritt jedoch eine erhöhte Querkzugfestigkeit und Druckscherfestigkeit bei der Faser Carbon 1 mit thermoplastkompatibler Schlichte auf. Dies entspricht bei der gewählten Verbundmatrix aus PP den Erwartungen. Die Schlagzähigkeit im Verbund fällt hingegen erwartungsgemäß gering aus, was auf das spröde Verhalten von Carbon unter Schlagbelastung zurückzuführen ist. Bezogen auf die mechanischen Eigenschaften der Einzelfasern weist Carbon insgesamt die höchsten Einzelfaserzugfestigkeiten auf, wobei Carbon 1 höhere Werte erreicht, als Carbon 2. Ebenfalls ist im Einzelfaserzugversuch eine Abhängigkeit der Bruchwahrscheinlichkeit von dem vorgeschalteten Trocknungsprozess zu beobachten, die durch eine mögliche Verfestigung der Schlichte entsteht.

In der nachstehenden Abbildung (Abb. 66) sind die spezifischen normierten Kennwerte der untersuchten Fasern nochmals vergleichend gegenübergestellt. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Kennwerte der Fasern mit thermoplastgeeigneter Schlichte. Es ist zu erkennen, dass die Faser Glas 2 ausgewogene Eigenschaften in allen Bereichen aufweist. Besonders die UD Schlagzähigkeit im Verbund ist im Vergleich zu den anderen Fasern erhöht, was für den späteren Belastungsfall von Vorteil ist. Die Carbonfaser 1 zeigt die höchsten gemessenen Zugfestigkeiten und die beste Performance unter Druckscherbelastung. Dagegen stehen geringe Grenzflächenscherfestigkeiten, was auf eine schwache Faser-Matrix Interaktion hinweist und eine ebenso geringe Schlagzähigkeit. Dieser Widerspruch ist auf die Messmethodik der Druckscherbelastung zurückzuführen, bei der die Druckeigenschaften der Carbonfaser einen höheren Einfluss auf die Messergebnisse haben, als die Schereigenschaften. Die Jutefaser weist die geringsten Eigenschaften in allen Kategorien auf. Ausnahme sind die guten Druckschereigenschaften im UD-Verbund, welche aufgrund der Oberflächenstruktur und der daraus resultierenden Verkrallung der Faser mit der Matrix entstehen.

Der untere Teil der Abbildung zeigt die spezifischen normierten Kennwerte der Fasern mit duroplastgeeigneter Schlichte. Im Vergleich mit dem oberen Teil der Abbildung ist zu erkennen, dass die Eigenschaften wesentlich geringer ausgeprägt sind. Dies ist bei den Verbundeigenschaften nicht zuletzt auf die Eignung der Schlichte zurückzuführen. Die Kennwerte der Faser Glas 1 sind durchschnittlich und liegen auf der normierten Skala zwischen 40-60 %. Eine Ausnahme bildet

die Performance bei Druckscherung, welche als unzureichend zu bezeichnen ist. Die Kennwerte von Carbon 2 sind bis auf die Zugfestigkeiten ebenfalls als durchschnittlich zu betrachten.

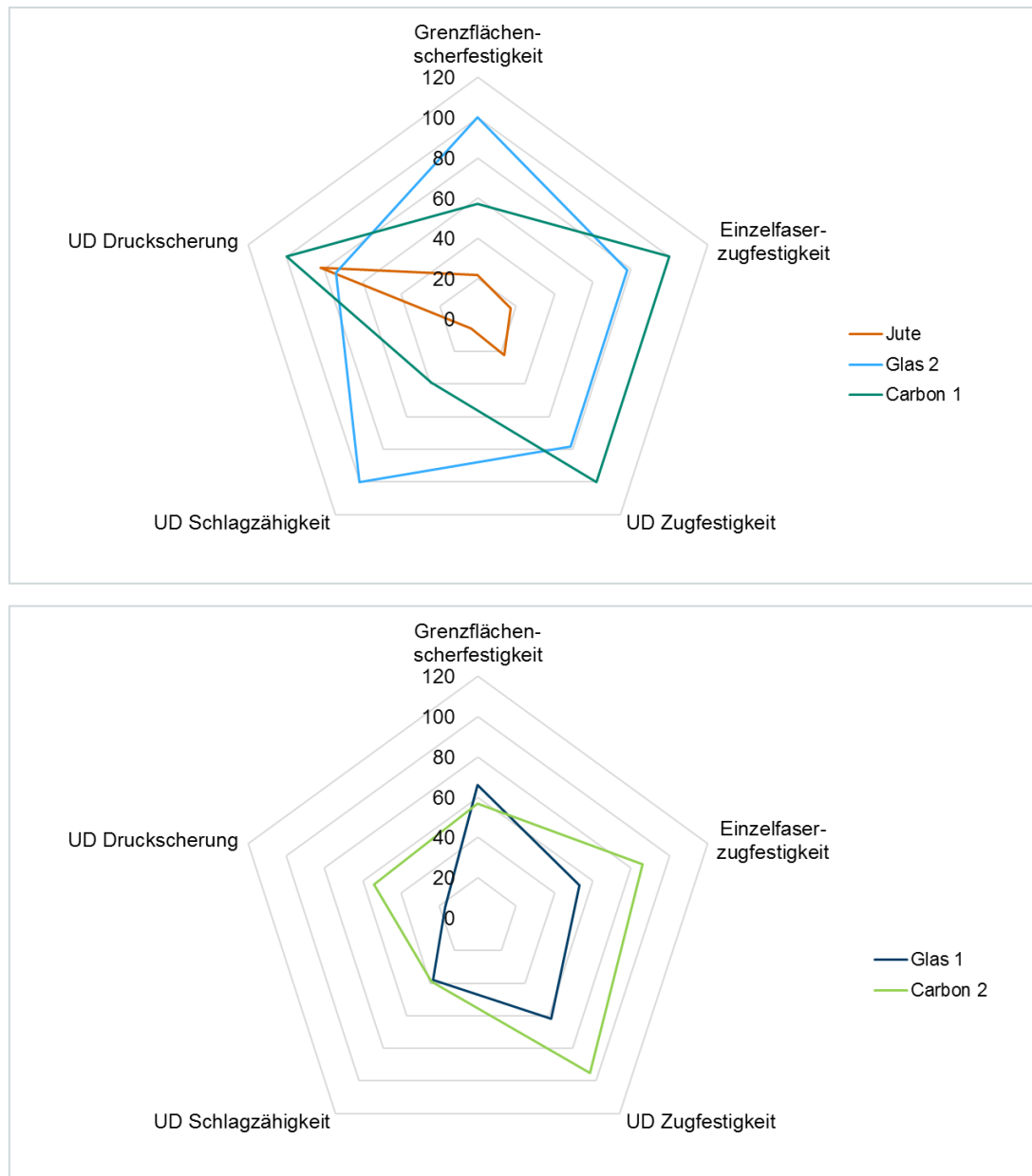


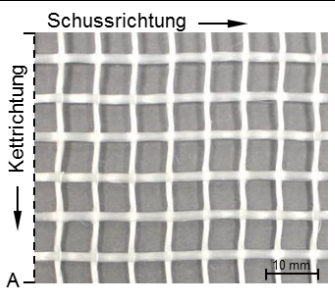
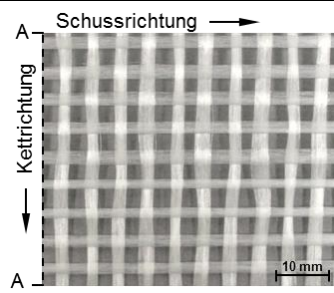
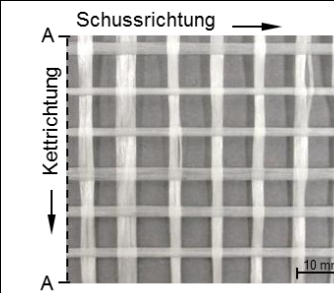
Abb. 66: Spezifische Faserkennwerte (einzeln und im UD-Verbund), normiert, für Fasern mit thermoplastgeeigneter Schlichte (oben) und duroplastgeeigneter Schlichte (unten)

Unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften sowie der Performance im Verbund und der Faser-Matrix Interaktion zeigen die Fasern Glas 2 und Carbon 1 mit thermoplastfreundlicher Schlichte (Abb. 66 oberer Teil) das größte Potential. Unter dynamischem Energieeintrag stellt sich die Faser Glas 2 als besonders geeignet heraus. Wird der wirtschaftliche Aspekt (Preis, Verarbeitungsaufwand Serie) mit einbezogen, bieten die Glasfasern, im speziellen Glasfaser 2 die größten Vorteile. Demzufolge wird die Faser Glas 2 als Basis für die gitterartigen Strukturen

verwendet. Ein bereits verfügbares Verstärkungsgitter der Fa. Delcotex, bestehend aus Glasfaser 1, wird als Referenzgitter in die Versuchsreihe mit aufgenommen. Ein Vorteil der Glasfaser 1 ist die Beständigkeit gegen UV-Strahlung und Korrosion, wobei letzteres für eine spätere Anwendung im Motorraum nützlich ist. In Anbetracht der ermittelten Kennwerte und der zugehörigen Streuungsbereiche ist eine Beeinflussung der Luftfeuchtigkeit für Carbon und Glas nicht signifikant. Ein Trocknungsprozess vor der Verarbeitung im Spritzguss ist demnach nicht notwendig. Tab. 23 zeigt die zum Einsatz kommenden Konfigurationen der Gewebe. Die Textilien werden mit unterschiedlichen Gitterabständen und Bindungsarten hergestellt. Das Drehergewebe ist eine etwas aufwendigere Webart mit einem besonderen Augenmerk auf Verschiebefestigkeit, die durch einen Binderfaden umgesetzt wird. Da zum Zeitpunkt der Gewebeerstellung eine Kombination aus Drehergewebe und PP-Infusion verfahrenstechnisch nicht möglich ist, wird auf die handelsübliche SBR-Beschichtung aus dem Portfolio der Fa. Delcotex zurückgegriffen. Die Leinwandbindung hingegen ist eine einfache Bindungsart mit kurzen Taktzeiten, die den wirtschaftlichen Aspekt der Herstellung in den Vordergrund stellt. Die Textilien mit dieser Bindungsart werden mit einer niedrigviskosen PP-Infusion versehen. Um eine optimale Durchströmung der Gittergewebe mit Spritzgusschmelze zu gewährleisten, ist der kleinste Gitterabstand, den zwei Kett- und Schussfäden bilden, auf 3 mm festgelegt. Der Abstand ist so gewählt, dass ihn eine Glasfaser der statistisch möglichen Maximallänge des PP-GF30 durchströmen kann. Da die Notwendigkeit einer Vortrocknung für Glasfasern falsifiziert werden konnte, erfolgt die Durchführung aller nachfolgenden Untersuchungen lediglich klimatisiert.

Tab. 23: Rahmendaten der verwendeten Gittergewebe 1 - 3

Gittergewebe	Bezeichnung	Verwendete Glasfaser	Gitterabstand [mm]	Bindungsart	Beschichtung/ Infusion
Gitter 1	SBR-5x5	Cem-FIL (Binderfaden PES)	5 mm	Dreher- bindung	SBR
Gitter 2	PP-3x3	StarRov 490	3 mm	Leinwand- bindung	PP
Gitter 3	PP-6x6	StarRov 490	6 mm	Leinwand- bindung	PP

 <p>Gitter 1 - SBR-5x5</p>	 <p>Gitter 2 - PP-3x3</p>	 <p>Gitter 3 - PP-6x6</p>
---	--	--

5.2 Ermittlung des Verarbeitungsfensters und Darstellung der Eigenschaftscharakteristik von Gittergeweben

In nachfolgendem Kapitel wird das Verarbeitungsfenster der Gittergewebe unter zu Hilfenahme thermischer Analyse ermittelt, um Materialschädigungen vorzubeugen. Die Grenzen der Form- und Drapierbarkeit werden über einen Scherrahmenversuch, einen Drape-Test und an einem lasersinternten Modell festgelegt. Die mechanischen Eigenschaften werden über die Gewebezugsfestigkeit ermittelt und dienen der Beurteilung des Verstärkungspotentials der Gittergewebe. Die Interaktion zwischen Roving und Spritzgussmatrix lässt abschließend Rückschlüsse auf die Interaktion mit dem Serienmaterial zu. Abb. 67 zeigt den zweiten Schritt der systematischen Entwicklungsstruktur. Der Fokus liegt auf Handling und Drapierbarkeit der Einleger, um einen generellen Einsatz von Verstärkungsgittern in zweidimensionalen und dreidimensionalen Geometrien zu bewerten.

Erarbeitung des Substitutionspotentials

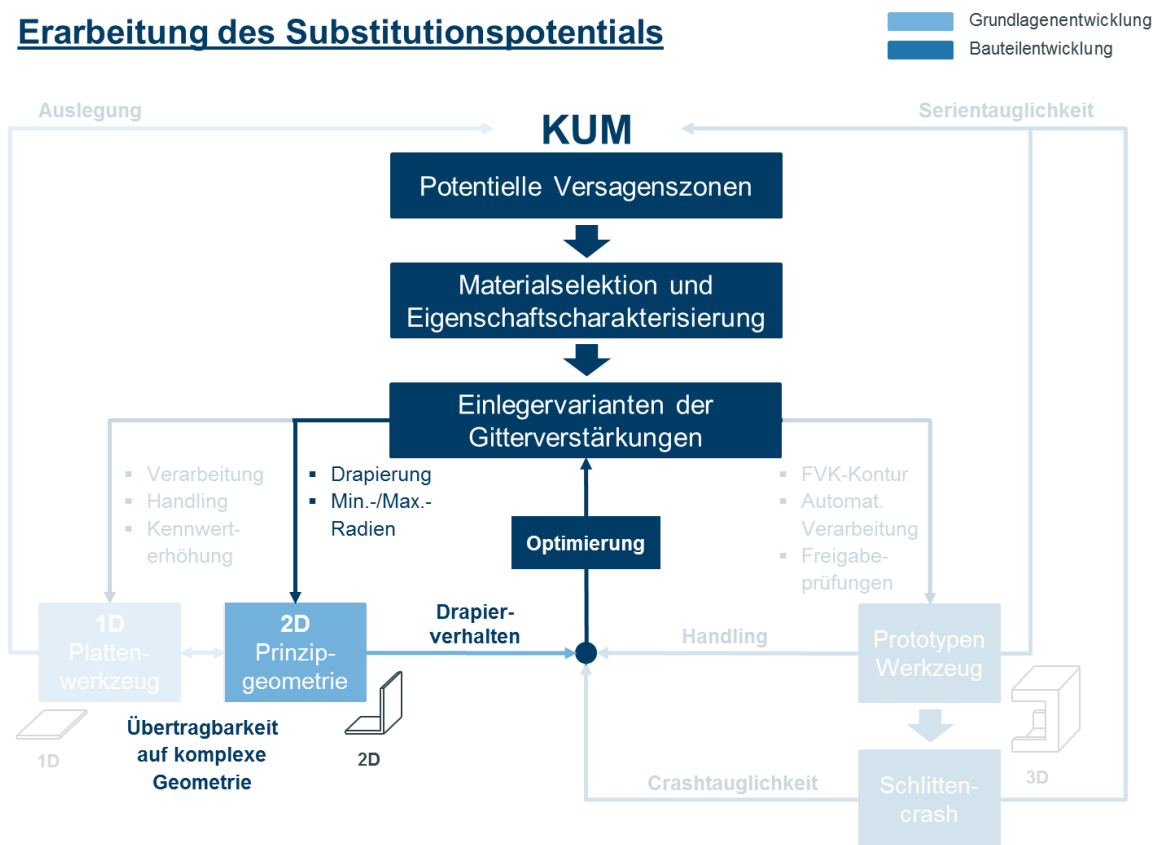


Abb. 67: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Festlegung der minimalen und maximalen Drapier-radien und Überprüfung der Übertragbarkeit auf komplexe Geometrien

5.2.1 Thermische Analyse mittels TGA und DSC

Die TGA ermittelt in erster Linie die Zersetzungstemperatur T_Z des Werkstoffs. T_Z ist Anhaltspunkt für die maximal zulässige Temperatur im Preformprozess, bevor eine Materialschädigung auftritt. Die Zersetzungstemperatur ($T_{Z,Onset}$) wird als Schnittpunkt der Tangenten im Bereich der Zersetzung angegeben. Jedoch kann schon im Bereich vor der Onsettemperatur von einer beginnenden Zersetzung ausgegangen werden. Daher werden zusätzlich die Temperaturen ermittelt, zu denen die Massegehalte der Proben gerade noch 100 % ($T_{Z,100}$) und 99 % ($T_{Z,99}$) betragen. In Abb. 68 ist der prozentuale Massegehalt des SBR-5x5 über der Temperatur dargestellt. Die jeweils geringste Zersetzungstemperatur der drei Einzelmessungen kennzeichnet die maximal zulässige Temperatur bei Umformung und Umspritzung im Werkzeug. Es ist zu erkennen, dass die Materialzersetzung des Gewebes, genauer des Binderfadens, bei einer Temperatur von etwa 311°C beginnt. Der Gewichtsverlust der Materialien findet aufgrund unterschiedlicher Zersetzungsreaktionen jeweils in zwei Stufen statt. Dieses Verhalten ist charakteristisch für SBR [95]. Ab einer Temperatur von 850°C kann von einer vollständigen Zersetzung der SBR-Schlichte und des Binderfadens ausgegangen werden, sodass die Restmasse ein Rückschluss auf den Glasfaseranteil des Gewebes gibt. Der Kett- und Schussfaden des SBR-Gewebes besteht zu einem Anteil von 87 % bzw. 83 % aus Glasfaser. Der Binderfaden wird vollständig zersetzt und wird mit einer Restmasse von 0 % aufgeführt.

Die anteilige Zusammensetzung der Gittergewebe mit PP-Infusion ist in der unteren Hälfte der Abb. 68 zu finden. Das PP-3x3 weist für Kett- und Schussfaden einen ähnlichen Faseranteil (82 % bzw. 83 %) auf. PP-6x6 hingegen zeigt für den Schussfaden einen Glasfaseranteil von 76 % im Gegensatz zu dem Kettfaden mit 83 %. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da laut Hersteller der gleiche Roving für Kette und Schuss verwendet wird. Die Zersetzungstemperatur $T_{Z,Onset}$ der PP-Infusion liegt im Bereich zwischen ~319°C und ~335°C.

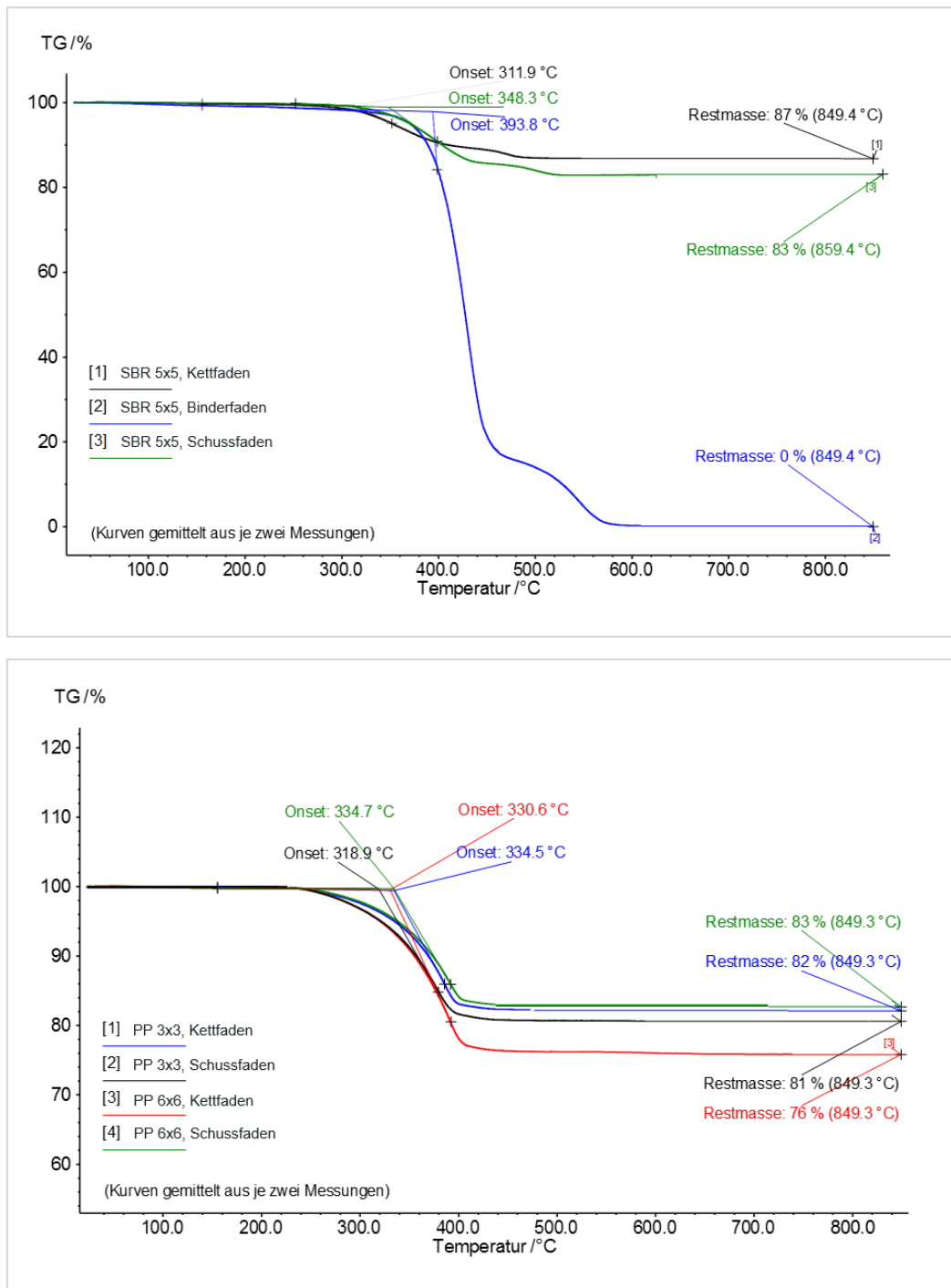


Abb. 68: TGA-Kurven SBR-5x5 (oben), PP-3x3 und PP6x6 (unten)

Da der SBR-Überzug als Elastomer keinen Schmelzpunkt aufweist und eine Glasübergangstemperatur unterhalb der Raumtemperatur besitzt, wird die DSC-Messung ausschließlich an der reinen PP-Infusion und am Binderfaden des SBR-Gitters vorgenommen. Wie die Tab. 24 zeigt, liegt der T_g der Polypropylen-Infusion unterhalb des gemessenen Temperaturbereichs. Der Schmelzpunkt T_m beträgt $\sim 141^\circ\text{C}$. Der Binderfaden des SBR-5x5 besteht aus Polyester (PES) mit Teilbeständen der SBR-Infusion, wobei der Schmelzpunkt T_m des Materials bei etwa 254°C

liegt. Ein Glasübergangspunkt T_g des PES zeichnet sich schwach bei etwa 214°C ab. Aufgrund der Verarbeitungstemperatur der Kunststoffmatrix bei etwa 260°C sind somit Filamentverschiebungen durch das Schmelzen des Binderfadens möglich.

Tab. 24: Thermische Kennwerte der Fasereinleger in °C ermittelt über TGA und DSC

Material		T_g	T_m	$T_{z,100}$	$T_{z,99}$	$T_{z,onset}$
SBR-5x5	Kettfaden	-40°C	/	108,4	290,2	311,9
	Schussfaden	-40°C	/	153,0	314,1	348,3
	Binderfaden (PES)	213,8	253,9	60,8	226,3	393,8
PP-3x3	Kettfaden	< 10	140,8	115,8	267,2	334,5
	Schussfaden	< 10	140,8	119,5	260,8	318,9
PP-6x6	Kettfaden	< 10	140,8	107,6	271,7	334,7
	Schussfaden	< 10	140,8	100,8	263,0	330,6

Festlegung des Temperaturfensters zum Preformen von Gittergeweben

Um die Gittergewebe endkonturnah vorzuformen, ist ein Vorwärmen des textilen Halbzeugs notwendig. Bei zu niedrigen Temperaturen wird die Umformung erschwert und die Rückverformung nach dem Preformen begünstigt. Die Gewebe mit PP-Infusion müssen demzufolge im Bereich dicht unterhalb des Schmelzpunktes umgeformt werden, um eine Verschiebung der Fasern zu verhindern. Als Preformbereich ist daher grundsätzlich eine Temperatur zwischen Glasübergangstemperatur T_g und Schmelzpunkt T_m bei Thermoplasten bzw. Zersetzungspunkt T_z bei Elastomeren zu wählen.

Die Zersetzungstemperatur $T_{z,100}$ erscheint als Wert für die maximale Temperatur im Umformprozess zu gering. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich noch keine Materialschädigung eintritt. Die Gewichtsreduktion unterhalb der Temperatur ist vermutlich auf Verunreinigungen des Materials zurückzuführen. Die Zersetzungstemperatur $T_{z,99}$ liegt bei allen Messungen unterhalb der Onsettemperatur $T_{z,onset}$. Als maximale Obergrenze des Umformbereichs wird daher die Temperatur $T_{z,99}$ bei 1 % Materialzersetzung gewählt. Abb. 69 zeigt grafisch ein empfohlenes Prozessfenster zum Preformen der Fasereinleger in Abhängigkeit der verwendeten Polymerinfusion. Das Material mit der PP-Infusion wird im Bereich zwischen der Glasübergangstemperatur ($T_g < 10^\circ\text{C}$) und des Schmelzpunktes ($T_m = 141^\circ\text{C}$) umgeformt. Da das SBR beschichtete Gitter keinen Schmelzpunkt besitzt, sollten die Temperaturen beim Umformen zwischen dem Glasübergang ($T_g < 10^\circ\text{C}$) und der Zersetzungstemperatur ($T_{z,99} = 226^\circ\text{C}$) liegen. Unter Einbezug der thermischen Kennwerte des Binderfadens wäre ein Temperaturbereich zwischen dem T_g ($T_{g,PES} = 214^\circ\text{C}$) und dem T_m ($T_{m,PES} = 253^\circ\text{C}$) des Polyesters sinnvoll. Vorversuche zeigen jedoch eine starke Verfärbung des Gewebes in diesem Temperaturbereich, was auf

einen thermischen Abbau schließen lässt. Die gewählten Umformtemperaturen für das SBR-5x5 und die PP-3x3/PP-6x6 werden auf 140°C festgesetzt.

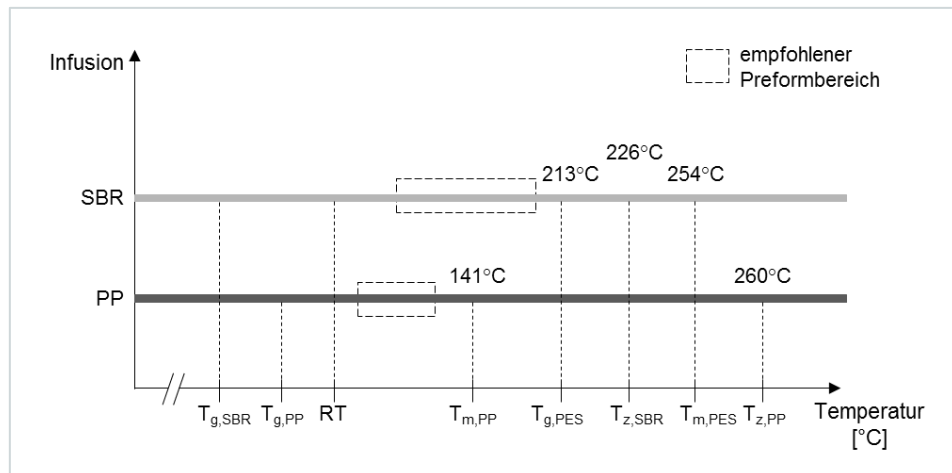


Abb. 69: Preform-Bereich für Gittergewebe mit SBR-Beschichtung und PP-Infusion [36]

5.2.2 Ermittlung der Drapierfähigkeit

Im Folgenden wird die Drapierfähigkeit der Gittergewebe anhand des Drapetests, eines Scher-rahmenversuchs sowie einer Abformung am lasergesinterten Modell bewertet. Die Untersuchungen sollen die Grenzen der Drapierbarkeit aufzeigen und Rahmenbedingungen für spätere Geometrieadjustierungen liefern.

Drapetest

Die Ergebnisse des Drapetests liefern eine Vielzahl an Aussagen, wie bspw. die Faserwinkeländerung, die Welligkeit und Unrundheit des Probekörpers sowie eine Beurteilung der Ondulation. Nachstehend werden jedoch nur Teilergebnisse der Prüfung vorgestellt, um die systematische Aussage zu erläutern.

In Abb. 70 ist die aufzubringende Kraft für die Formung der Drapierstufen für PP-3x3 und PP-6x6 zu sehen. Erwartungsgemäß muss für die Drapierung des PP-6x6 Gewebes weniger Kraft aufgewendet werden, als bei dem Gewebe PP-3x3. Die maximale Kraft zur Drapierung der 80 mm Stufe liegt für das PP-6x6 bei ~143 N. Das PP-3x3 benötigt ~ 221 N, wobei eine Auffälligkeit in der Kurve vorhanden ist. Der Knick bei Stufe 60 mm deutet auf eine partielle Lösung der Bindungspunkte hin, wie sie auch in dem Teilausschnitt zu sehen ist. Bei dem Gewebe PP-6x6 tritt auf Grund der erhöhten freien Weglänge noch keine Ablösung auf, sodass der Kurvenverlauf sich nahezu linear darstellt.

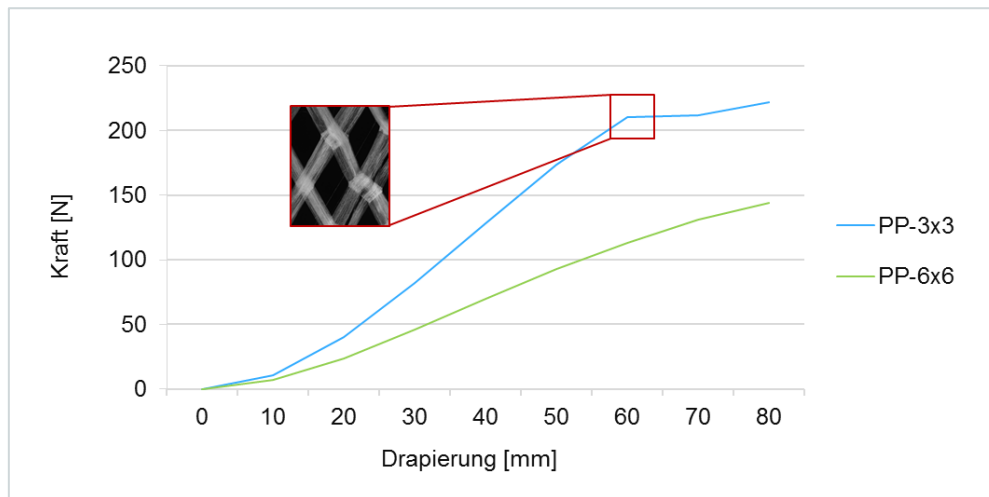


Abb. 70: Kraftaufwendung für die Drapierung von PP-3x3 und PP-6x6 mittels Drapetest, modifiziert [96]

Die Abb. 71 stellt beispielhaft die auftretenden Scherwinkel in den unterschiedlichen Drapierstufen dar. Die Aufnahmen erfolgen in 360° für PP-3x3 (45° Abstufungen). Grundsätzlich ist zu erkennen, dass mit einer höheren Drapierstufe ein größerer Scherwinkel auftritt, wobei der maximale Scherwinkel mit 80 mm Verformung bei ~32° liegt. Auffällig ist die erhöhte Divergenz zwischen den gemessenen Scherwinkeln, die bei einer Verbindung der Messpunkte zu einem gezackten Kurvenverlauf führt. Diese eindeutige Divergenz tritt erst bei einer Verformung von 30 mm in Erscheinung und ist dem Aufbau des Gittergewebes geschuldet. Bei Aufnahmen in 0°, 90°, 180° und 270° Ausrichtung wird jeweils entlang eines Schuss- oder Kettfadens gemessen. Auf Grund der fixierten Bindungspunkte tritt hier nur eine sehr geringe Scherung auf. Die Aufnahmen in 45°, 135°, 255° und 315° erfolgen diagonal zu den von Kett- und Schussfäden gebildeten Fenstern und zeigen so, in Anbetracht der freien Weglänge, eine erhöhte Scherung.

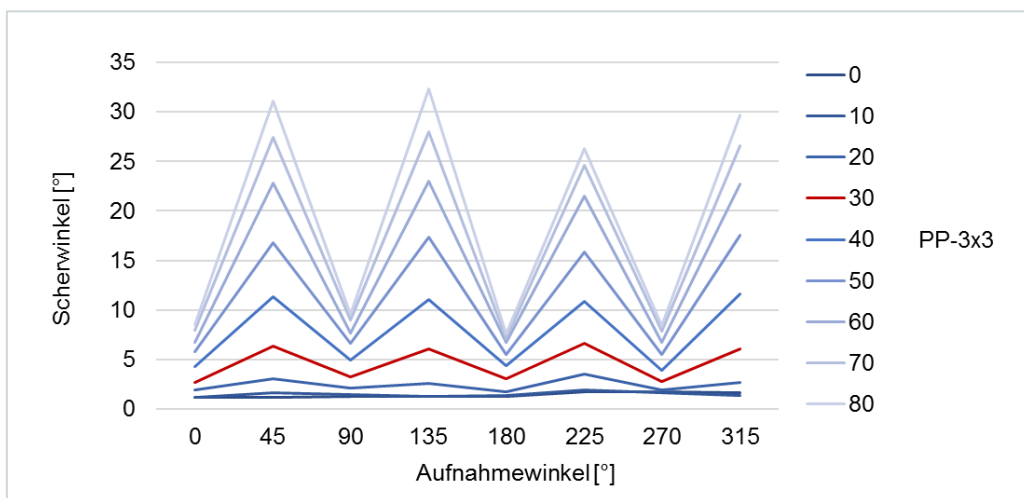


Abb. 71: Auftretende Scherwinkel bei Drapierung zw. 0-80 mm von PP-3x3, gemessen in 360°, modifiziert [96]

Die Scherung hat ebenfalls Einfluss auf die Größe der Gitterabstände im Gewebe. Der Abstand steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Tränkungsverhalten der SG-Matrix und ist für den späteren Verarbeitungsprozess in der Serie relevant. In Abb. 72 ist zu erkennen, dass eine signifikante Verringerung der maximalen Gitterlochbreite bei einer Drapierstufe von 50 mm einsetzt und mit steigender Drapierung partiell bis auf ein Minimum von $< 2,5$ mm (Drapierstufe 80 mm) sinkt. Um die nötige Breite für die statistisch mögliche Maximallänge der Verstärkungs-faser des PP-GF30 sicherzustellen, muss die Verformung bei Drapierung < 50 mm sein. Zusätzlich ist eine heterogene Verteilung der Messpunkte zu erkennen, die auf die partielle und teilweise unterschiedliche Anlösung der verklebten Bindungspunkte zurückzuführen ist. Demnach halten einige Gitterlöcher der Verformung länger stand als andere.

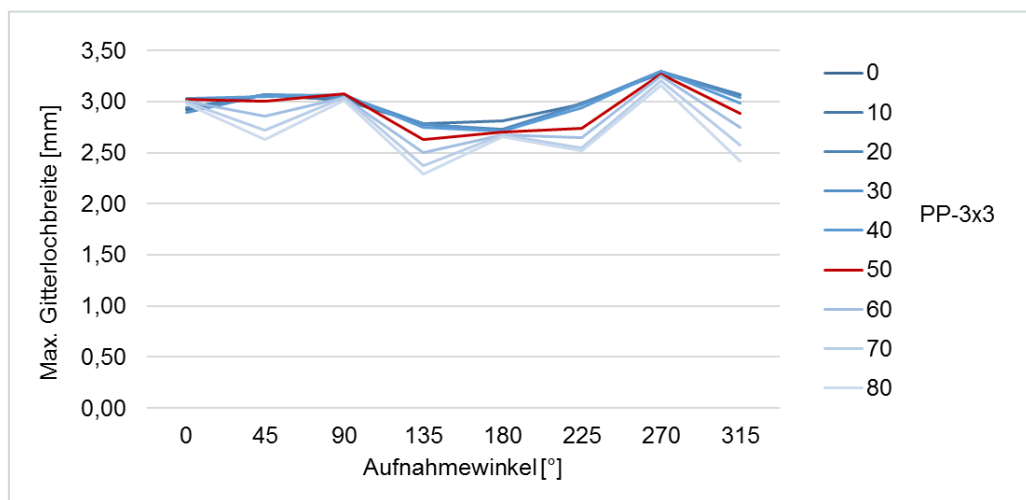


Abb. 72: Maximale Gitterlochbreite bei Drapierung zw. 0-80 mm von PP-3x3, gemessen in 360°, modifiziert [96]

Durch die Verschiebung der Kett- und Schussfäden während des Drapiervorgangs erfolgt eine Aufwölbung und Faltenbildung an der Oberfläche. Abb. 73 zeigt die maximal auftretende Faltenhöhe innerhalb der Drapierstufen, gemessen in 360° anhand des PP-3x3. Die erste augenscheinliche Aufwölbung tritt bei 30 mm Verformung auf und zeigt eine maximale Faltenhöhe von ca. 1,2 mm. Mit steigender Drapierung erhöht sich ebenfalls die Faltenhöhe, wobei die Faltenbildung ungleichmäßig verteilt ist. Es ist zu erkennen, dass sich der Probekörper lediglich zu einer größeren Falte bei 225° aufwölbt. Dieser Peak beträgt bei der höchsten Drapierstufe 5 mm Faltenhöhe. Um einer Faltenbildung bei der späteren Drapierung im Spritzgusswerkzeug und einer Beeinflussung der Spritzgussmasse während des Füllvorgangs vorzubeugen, dürfen auf Grund der Bauteilwandstärke lediglich Falten in Höhe von ~ 1 mm entstehen. Demnach darf eine Verformung > 30 mm bei der Drapierung nicht überschritten werden.

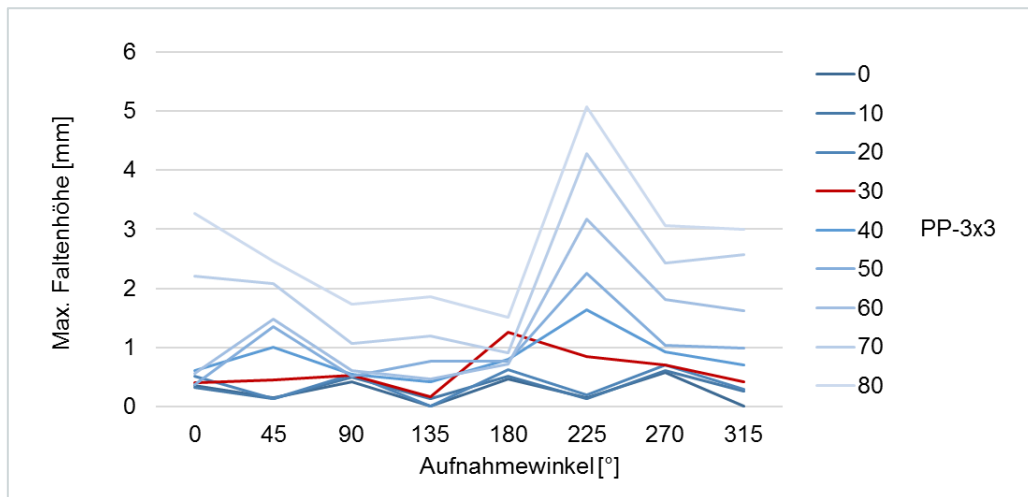


Abb. 73: Maximale Faltenhöhe bei Drapierung zw. 0-80 mm von PP-3x3, gemessen in 360°, modifiziert [96]

Scherrahmenversuch

In Abb. 74 ist die Scherkraftabweichung in [%] über dem Scherwinkel in [°] am Beispiel der Probe PP-3x3 in -45° Messrichtung dargestellt. Nach ORAWATTANASRIKUL ist bei einer Abweichung des linearen Kurvenverlaufs um > 5 % der Grenzscherwinkel erreicht. Demzufolge liegt in diesem Beispiel φ_{Grenz} bei etwa 5° und 26,94 N Scherkraft. Der Zeitpunkt, an dem die Faltenbildung beginnt wird optisch ermittelt. Dieser definiert den kritischen Scherwinkel. In Tab. 25 sind die Ergebnisse der Gittergewebe für den Scherrahmenversuch aufgelistet. Da der Zeitpunkt der Faltenbildung für weitere Untersuchungen im Mittelpunkt steht, ist der Tabelle lediglich φ_{krit} mit der zugehörigen Scherkraft zu entnehmen. Die Reibverluste innerhalb des Scherrahmens werden in dem Referenzversuch ohne Gitter als so gering festgestellt, dass sie bei der Berechnung der Scherkraft vernachlässigt werden können.

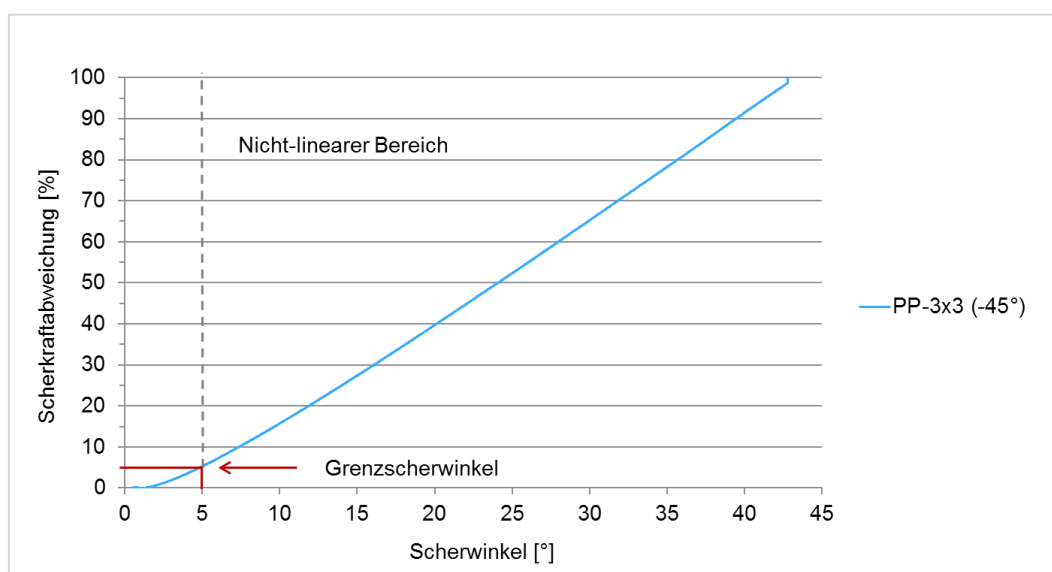


Abb. 74: Prozentuale Scherkraftabweichung am Beispiel Gittergewebe PP-3x3 bei -45°

Das Gewebe SBR-5x5 weist bei maximal gemessenem Verformungsweg von 60 mm und einem Scherwinkel von 48° keine Faltenbildung auf. Demzufolge ist kein kritischer Scherwinkel vorhanden. Die mit *-markierte Scherkraft ist hier die maximal aufgebrachte Kraft während des Schervorgangs. Durch die Dreherbindung ist eine erhöhte Scherung an den Kreuzungspunkten möglich, ohne dass sich die Fasern gegeneinander verschieben und das Gewebe sich aufwölbt. Die gemessene Maximalkraft liegt zwischen 22,9 N und 27,3 N und weist damit einen erwartungsgemäßen Unterschied zwischen den Messrichtungen auf. Dieser Unterschied ist auf den Binderfaden aus PES zurückzuführen, der bei Ausrichtung in -45° der Scherbelastung entgegen wirkt. Abb. 75 zeigt die drei unterschiedlichen Gewebe in geschärtem Zustand. Besonders zu beachten ist das SBR-5x5, welches keine Faltenbildung aufwirft.

Das Gittergewebe PP-3x3 zeigt eine starke Faltenbildung bedingt durch die im Vergleich hohe Anzahl an Fäden/cm². Die Faltenbildung tritt hierbei bereits nach einer Längenänderung von ~ 10 mm auf. Die gemessene Scherkraft ist erwartungsgemäß erhöht. Das Gewebe PP-6x6 weist ebenfalls eine Faltenbildung auf, die sich jedoch optisch nicht so stark ausprägt, wie bei zuvor genanntem Gewebe. Weiterhin setzt die Faltenbildung erst bei erhöhter Längenänderung und demzufolge bei einem größeren Scherwinkel ein.

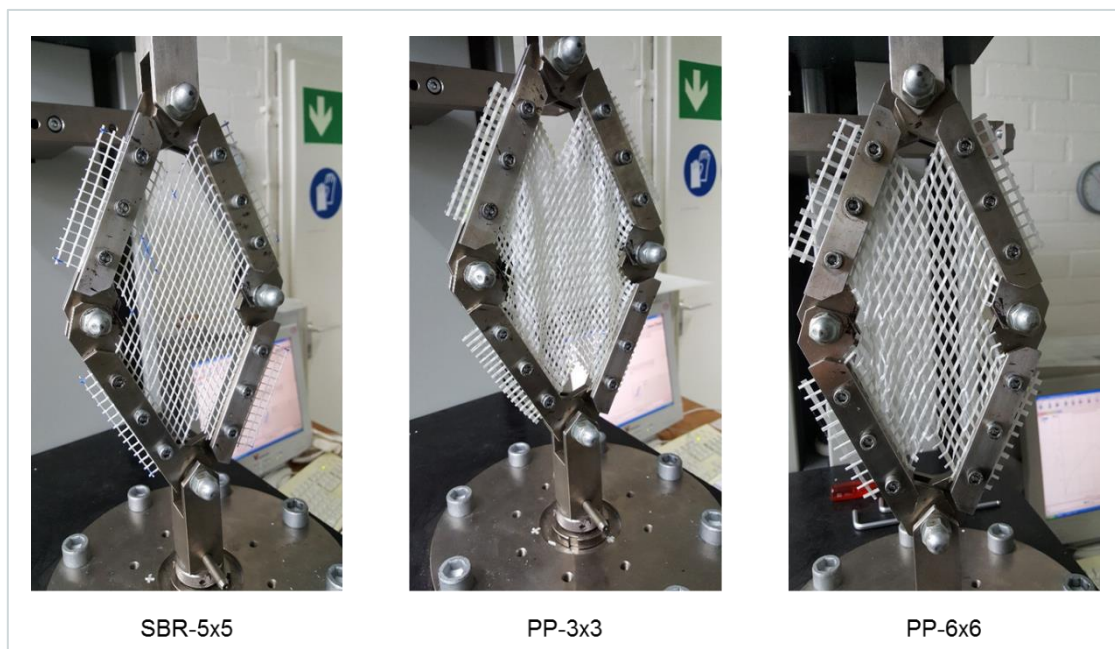


Abb. 75: Gescherte Gittergewebe; SBR5x5 (links), PP-3x3 (mitte), PP-6x6 (rechts)

In Abb. 76 sind die kritischen Scherwinkel mit zugehöriger Scherkraft für die Gewebe PP-3x3 und PP-6x6 in $\pm 45^\circ$ Messrichtung dargestellt. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass das PP-3x3 geringe kritische Scherwinkel bei erhöhter Scherkraft aufweist. Die Längenänderung bis zum

Eintritt der Faltenbildung ist vergleichsweise gering (vgl. Tab. 25). Unter Betrachtung der Messrichtung sind für das PP-3x3 nur marginale Abweichungen von φ_{krit} ersichtlich. Bei einer Ausrichtung von $+45^\circ$ ergibt sich ein kritischer Scherwinkel von $6,73^\circ$ bei 54,64 N aufgebrachter Scherkraft. In -45° Ausrichtung ist ein geringerer kritischer Scherwinkel von $6,08^\circ$ zu beobachten. Die Scherkraft steigt auf 59,11 N an, wobei sich die Längenänderung nur geringfügig unterscheidet. Im Mittel liegt diese bei 10,3 mm bis zum Erreichen von φ_{krit} .

Bei dem Gewebe PP-6x6 zeigen sich im Allgemeinen geringere Scherwinkel und Scherkräfte bei erhöhter Längenänderung. In Bezug auf die Messrichtung sind auch hier nur marginale Unterschiede erkennbar. In $+45^\circ$ Richtung tritt eine Faltenbildung bei $14,43^\circ$ und einer Scherkraft von 36,02 N auf. Bei einer Messung in -45° Richtung beginnt die Faltenbildung bereits bei $13,11^\circ$ und einer Scherkraft von 34,68 N. Die Längenänderung liegt im Mittel bei 22,3 mm und ist damit doppelt so hoch, wie die mittlere Längenänderung des PP-3x3 Gewebes.

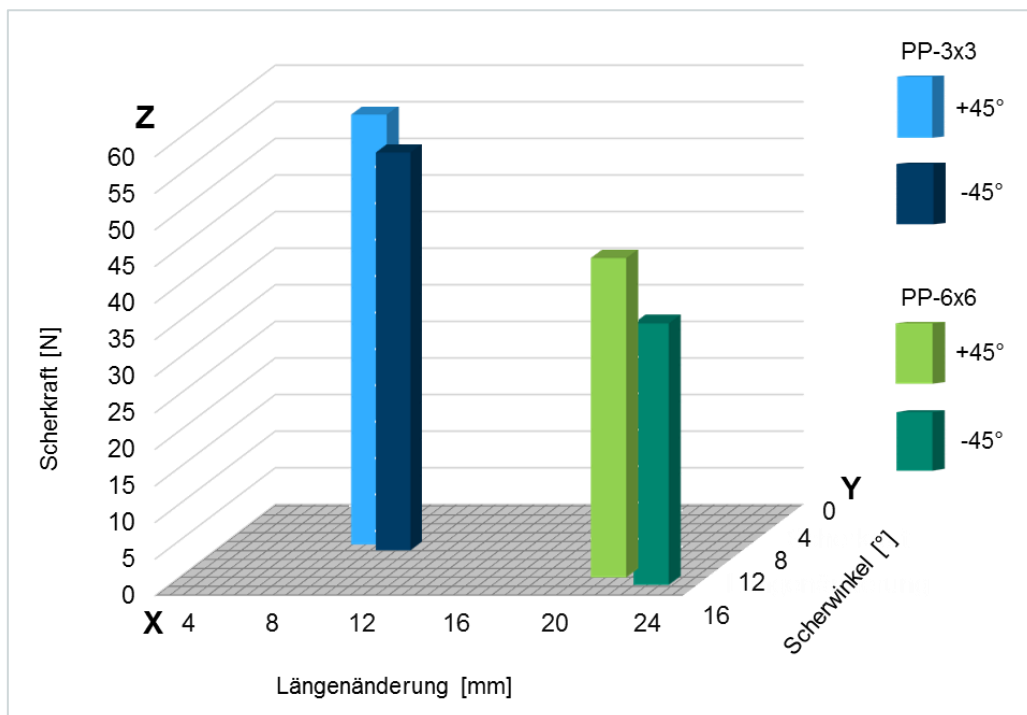


Abb. 76: Darstellung der Zusammenhänge Scherwinkel-Scherkraft-Längenänderung im dreidimensionalen Raum

Die erhöhte Längenänderung bis zum Eintritt der Faltenbildung bei Gewebe PP-6x6 ist auf den großen Gitterabstand von 6 mm und die demzufolge geringe Fadendichte (Fäden/cm²) zurückzuführen. Es muss ein größerer Weg zurückgelegt werden, bis sich die Längenänderung auf das Gewebe auswirkt. Gleichsam ist die aufgebrachte Scherkraft, die für die Deformation notwendig ist geringer, als die des PP-3x3 Gewebes. Dieses Verhalten ist erwartungsgemäß und darauf zurück zu führen, dass bei dem dichter gewebten Material eine höhere Anzahl an Fäden vorliegt

und somit eine erhöhte Steifigkeit bezogen auf eine vergleichbare Probenfläche vorherrscht. Die erhöhte Fadendichte führt außerdem zu einem geringen kritischen Scherwinkel, da die Verschiebung der Fäden gegeneinander begrenzt ist und es somit schon bei geringer Scherung zu einer Aufwölbung des Gewebes kommt. Bezogen auf die unterschiedlichen Bindungsarten fungiert die erwähnte Dreherbindung in den Kreuzungspunkten als eine Art Scherengelenk. Im Gegensatz dazu sind die Kreuzungspunkte der Leinwandbindung auf Grund der PP-Infusion verschmolzen und somit unbeweglich, was vermehrt zur Faltenbildung beiträgt. Finden die Scherrahmenversuche im erhöhten Temperaturbereich ($>141^{\circ}\text{C}$) und mit ausreichender Temperierungsphase statt, ist zu erwarten, dass die Haftung an den Bindungspunkten des Leinwandgewebes, welche durch die PP-Infusion hervorgerufen wird, nachlässt. Dies hätte zur Folge, dass eine zusätzliche Flexibilität im Gewebe entsteht, die den kritischen Scherwinkel bei sinkender Scherkraft erhöhen würde. Bei dem Einspritzvorgang ist die Zeitspanne zwischen fließfähigem und erstarrtem Matrixmaterial so kurz, dass die Temperatur der Spritzgussmasse nicht ausreicht, um die verschmolzenen Bindungspunkte im Gewebe anzulösen. Folglich werden keine Scherrahmenversuche mit erhöhter Umgebungstemperatur durchgeführt.

Tab. 25: Scherkennwerte der Gittergewebe über Scherrahmenversuch

Material		Längenänderung bei Faltenbildung [mm]	φ_{krit} [°]	Scherkraft [N]
SBR-5x5	+ 45°	-	-	22,9*
	- 45°	-	-	24,3*
PP-3x3	+ 45°	10,85	6,73	54,64
	- 45°	9,76	6,08	59,11
PP-6x6	+ 45°	23,33	14,43	36,02
	- 45°	21,21	13,11	34,68

Drapierung am lasergesinterten Modell

Die Verschiebung der einzelnen Rovings innerhalb der Gitter wird zusätzlich an einem lasergesinterten Modell der Bauteil-Seriengeometrie geprüft. Dabei sind in Kett- und in Schussrichtung nur marginale Unterschiede festzustellen. Demzufolge ist hier lediglich die Kettrichtung aufgezeigt. Auch ein Erwärmen auf die in Kapitel 5.2.1 ermittelte Preformtemperatur zeigt nur einen geringfügigen Einfluss auf die Drapierung, was auf die Eigensteifigkeit der Glasfasern zurückzuführen ist. In Abb. 77 sind die Verschiebungen auf der Abszisse gegenüber unterschiedlichen Dapierradien in Kettrichtung aufgetragen. In diesem Beispiel wurden die Gitter nicht vorgewärmt. Die aufgetragenen Messwerte ähneln einem exponentiell abnehmendem Kurvenverlauf. Allgemein ist zu sehen, dass mit kleiner werdenden Radien die durchschnittliche Verschiebung der Rovings zunimmt. Bezogen auf die Bindungsart zeigt die Dreherbindung des SBR-5x5 die

kleinsten Verschiebungen. Dies liegt sowohl in der speziellen Bindungsart mit den zwei Kettfädensystemen als auch in der SBR-Beschichtung begründet und spiegelt die Ergebnisse des Scherrahmenversuchs wieder. Die Gitter mit PP-Infusion zeigen deutlich höhere Verschiebungen. Für einen Radius von 4 mm liegt bei PP-6x6 eine Verschiebung von ca. 1,1 mm bzw. bei PP-3x3 eine Verschiebung von ca. 0,5 mm vor. Die erhöhten Werte bei PP-6x6 sind unter anderem auf die zum Teil bereits aufgefächerten Rovings nach dem Infusionsvorgang sowie auf den Bindungsabstand der Leinwandbindung von ca. 6 mm zurückzuführen. Im Gegensatz dazu besitzt das PP-3x3 Gewebe einen geringeren Abstand von 3 mm. Es zeigt sich eine erwartungsgemäß höhere Eigenstabilität und Verschiebefestigkeit während des Drapiervorgangs. Der kritische Drapierradius liegt nach [50] bei etwa 14 mm für Glasfasern. Dieser Wert kennzeichnet jedoch nicht die Drapiergrenze der Fasern, sondern lediglich den kritischen Radius, ab dem eine Faserschädigung eintritt. Demzufolge werden für den weiteren Verlauf Radien ≥ 14 mm für die faserverbundgerechte Konstruktionsabänderung des KUM-Werkzeugs festgelegt.

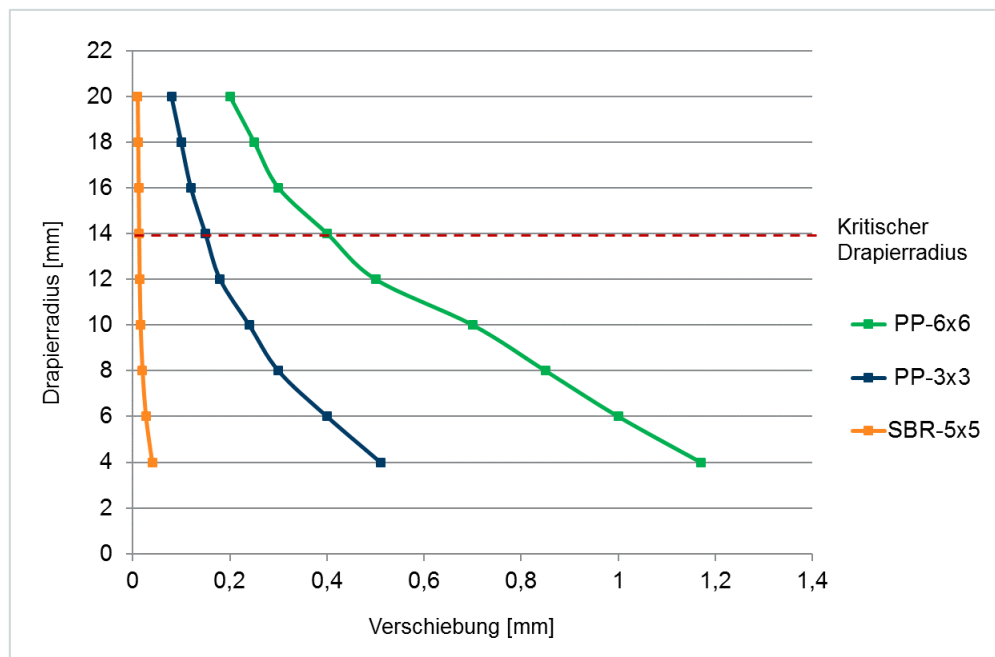


Abb. 77: Drapierradius über der Verschiebung in Kettrichtung, ohne Vorwärmung

5.2.3 Gewebezugfestigkeit

Die Gewebezugfestigkeiten sind in Abb. 78 grafisch dargestellt. Zu sehen ist die Kraft in Newton über der Dehnung in Prozent. Allgemein ist festzuhalten, dass die nachfolgenden Interpretationen aufgrund der auftretenden Streuungen lediglich als Tendenzen zu bewerten sind. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Zugfestigkeiten in Schussrichtung höher sind als die in Kettrichtung. Dieses untypische Verhalten kann auf die verfahrensbedingte Spreizung des

Schussfadens und eine damit zusammenhängende bessere Kraftübertragung zurückgeführt werden. Als typisches Verhalten ist die erhöhte Dehnung in Schussrichtung anzuführen. Da die Schussfäden meist locker in einem ungestreckten Zustand vorliegen, werden die Fäden im ersten Schritt gestreckt und erst anschließend der tatsächlichen Dehnung unterzogen. Im Vergleich der Gewebe untereinander besitzt das PP-3x3 in Kett- und in Schussrichtung tendenziell die höchste Zugfestigkeit (423 N bzw. 461 N) und die höchste gemessene Dehnung. Dies ist im Vergleich zu den anderen Geweben auf die hohe Fadendichte (Fäden/cm²) zurückzuführen. Das zweite Gewebe mit PP-Infusion und dem größten Bindungsabstand (PP-6x6) verfügt demzufolge über die geringsten Werte (351 N bzw. 368 N). Es ist zu erkennen, dass die Kurve in Kettrichtung einen steileren Verlauf bis 1 % Dehnung zeigt, als die Kurve in Schussrichtung. Folglich verhält sich der Kettfaden unter Zugbeanspruchung steifer, als der Schussfaden. Dies spiegelt sich auch in den Verläufen der übrigen Kurven wieder. Das Gewebe SBR-5x5 liegt mit den Werten der Zugfestigkeit erwartungsgemäß zwischen den Werten der PP-Gewebe.

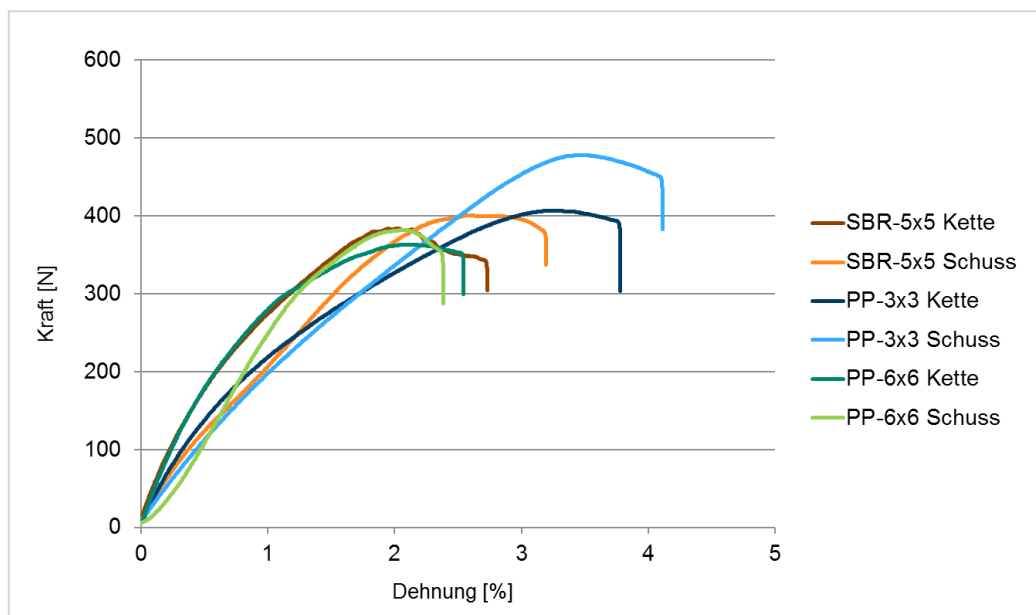


Abb. 78: Kraft-/Dehnungsdiagramm ermittelt nach DIN EN ISO 13934-1

Um den Faserausschöpfungsgrad der Einzelfasern im Gittergewebe zu beurteilen, wird die Zugfestigkeit als Indikator festgelegt. Da das Gittergewebe nicht vollflächig geschlossen ist, wird in einer Annäherung die gemessene Maximalkraft auf eine theoretisch berechnete Fläche bezogen und so die Zugfestigkeit ermittelt. Hierzu wird die Dichte mit der Texzahl (1 tex = 1 g/km) wie folgt verrechnet:

$$\text{Querschnitt Einzelroving [cm}^2\text{]} = \frac{\text{Stärke der Faser in Gramm} \cdot \text{cm}^3}{\text{km} \cdot \text{Dichte der Faser}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{100.000 \text{ cm}}$$

Gleichung 15

Der Querschnitt wird in Abhängigkeit der Gitterabstände mit der auftretenden Anzahl an zugbelasteten Rovings in einem Probekörper multipliziert. Für Kett und Schussfäden werden dieselben Rovings verwendet, wonach hier keine Unterscheidung der Ausrichtungen getätigt wird. Tab. 26 zeigt die ermittelten theoretischen Flächen für die Gittergewebe.

Tab. 26: Errechnete Fläche der Gittergewebe in Zugprobe

Material		Querschnitt Roving [cm²]	Anzahl Rovinge in Zugprobe	Fläche Gittergewebe in Zugprobe [cm²]	Gemessene max. Kraft im Zugversuch [N]
SBR-5x5	Kette	0,00239	13	0,03107	392
	Schuss				379
PP-3x3	Kette	0,00231	22	0,05082	423
	Schuss				462
PP-6x6	Kette	0,00231	11	0,02541	351
	Schuss				368

In der Tab. 27 sind die Zugfestigkeiten der Einzelfasern und Gittergewebe (jeweils Kett- und Schussrichtung) im Vergleich dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich die Werte der Einzelfasern und der Gittergewebe deutlich voneinander unterscheiden. Im Vergleich der Einzelfaserzugfestigkeiten untereinander fällt auf, dass die Cem-FIL Faser nur ca. 2/3 die Zugfestigkeit der StarRov Faser zeigt. Bezogen auf den molekularen Aufbau und der Zusammensetzung der Faser, entspricht dies den Erwartungen und bestätigt die Erkenntnisse von FLEMMING ET AL. in [38]. Die Dehnung der Cem-FIL Einzelfaser zeigt Werte von ~2,7 %, was dem elastischen Verhalten der Glasfaser entspricht. Die StarRov Einzelfaser besitzt eine durchschnittliche Zugdehnung von ~4,1 % und liegt damit über den Werten der Cem-FIL Faser.

Bei Betrachtung der Gewebezugfestigkeiten fällt auf, dass das PP-6x6 Gewebe in Bezug auf seine Fläche die besten Eigenschaften aufweist. Ähnlich gute Kennwerte zeigt das SBR-5x5. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da die Einzelfaserzugfestigkeiten der Basisfasern deutlich divergieren. Die niedrigste Zugfestigkeit und somit den geringsten Faserausschöpfungsgrad besitzt das PP-3x3. Aufgrund des gitterartigen Aufbaus und der Probengeometrie wirkt die eingeleitete Kraft im Gewebezugversuch auf eine sehr geringe Fläche. Somit erreicht die Gewebezugfestigkeit nur einen Bruchteil des Wertes der Einzelfaserzugfestigkeit. Bei dem SBR-Gewebe sind es ~6,4 % der Einzelfaserzugfestigkeit. Bei den PP-Geweben liegen die Werte für die Kombination 3x3 bei ca. 3,0 % und für 6x6 bei ca. 5 % der Einzelfaserzugfestigkeit. Die gemessene

Dehnung bei dem Gewebezugversuch deutet auf eine Streckung der ondulierten Rovings hin, wie sie auch von BITTNER in [54] beschrieben wird. Dabei zeigt das PP-3x3 Gewebe die höchste Dehnung auf Grund der vorliegenden häufigen Ondulation und der zugehörigen freien Weglänge bei Zugbeanspruchung. Die Dehnungen des PP-6x6 und des SBR-5x5 sind erwartungsgemäß niedriger.

Tab. 27: Vergleich Zugfestigkeiten von Einzelfasern und Gittergeweben (klimatisiert)

Material			σ_M [MPa]	ϵ [%]
SBR	Einzelfaser		1940	2,7
	Gittergewebe 5x5	Kette	126,16	2,2
		Schuss	121,98	2,4
PP	Einzelfaser		2861	4,1
	Gittergewebe 3x3	Kette	83,23	3,6
		Schuss	90,71	3,4
	Gittergewebe 6x6	Kette	138,13	2,0
		Schuss	144,82	1,8

5.2.4 Charakterisierung der Roving-Matrix Interaktion

In diesem Kapitel wird die Roving-Matrix Interaktion mittels Faserbündelauszugskraft und Schliffbildern des Polymerüberzugs untersucht. Als Matrix dient das Serienmaterial PP-GF30 des aktuellen *Tiguan* KUM. Hierdurch soll sowohl die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Kapitel 5.1.2 geprüft, als auch eine Aussage für die spätere Performance im Verbund des Serienbauteils getätigt werden.

Faserbündelauszugskraft

Die Faserbündelauszugskraft ist in Abb. 79 exemplarisch für ein SBR-5x5 und PP-6x6 dargestellt. Allgemein ist festzuhalten, dass sich alle Proben aus der Matrix ausziehen lassen und kein Bruch der Fasern auftritt. Die verwendete Einbettlänge von 10 mm stellt sich als geeignet heraus. Im Vergleich der beiden Kurven untereinander fallen unterschiedliche Kurvenverläufe und somit unterschiedliche Faser-Matrix Interaktionen auf, welche die Ergebnisse der Single-Fibre Pull-Out Versuche aus Kapitel 5.1.2 bestätigen. Bei dem Roving des PP-6x6 Gewebes ist ein nahezu linearer Kraftanstieg bis zu einem Peak von ca. 200 N erkennbar. Der Bereich bis zu diesem Punkt kennzeichnet den Auszugsvorgang, bevor ein Abgleiten zwischen Matrix und Faserbündel einsetzt. Der Abfall der Kurve nach dem Peak zeigt, dass ein Auszug des Faserbündels aus der Polymermatrix bei einer geringeren Kraft stattfindet. Der Roving des SBR-5x5 zeigt hingegen

erst einen flachen linearen Kraftanstieg auf ~ 15 N bei einem Weg von ca. 0,65 mm, bis sich die Steigung der Kurve erhöht und ein kurzer plateauartiger Zustand bei ~ 108 N und 2,7 mm erreicht ist. In diesem Abschnitt zeichnen sich Kraftabfälle und -sprünge ab. Anschließend tritt ein seichter Abfall der Kurve ein. Dieser Verlauf zeigt eine kurze Auszugsphase/Debondingphase (linearer Bereich) und eine lange Gleitphase, die unter anderem durch Oberflächenunebenheiten (vgl. Kapitel 5.1.1) beeinflusst wird. Das Verhältnis von Auszugs- zu Gleitphase bestätigt eine schwache Faser-Matrix Interaktion von Cem-FIL zu PP-GF30, wie sie bereits in Kapitel 5.1.2 diskutiert wurde. Im Vergleich zu dem SBR-5x5 Roving ist die gemessene Auszugskraft des PP-6x6 Rovings etwa doppelt so hoch bei ca. einem Drittel des Auszugswegs.

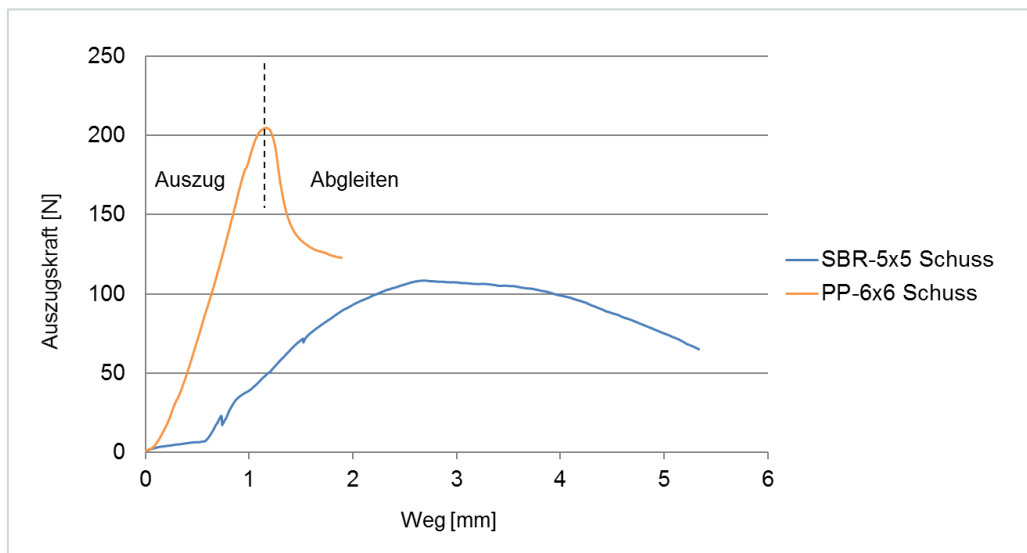


Abb. 79: Exemplarischer Kraft-Weg-Verlauf beim Faserbündelauszug [36]

Abb. 80 zeigt die Auszugskraft/mm bezogen auf die Einbettlänge für die unterschiedlichen Faserbündel mit zugehörigen Standardabweichungen. Die Auszugskraft in Bezug auf die Einbettlänge der Proben mit SBR-Infusion beträgt für den Kettfaden etwa 11,7 N/mm. Der entsprechende Schussfaden des Gewebes zeigt mit ca. 9,5 N/mm eine etwas geringere Auszugskraft, die jedoch im Bereich der Standardabweichung (Überlagerung der entsprechenden Fehlerbalken) liegt. Die Proben mit PP-Infusion zeigen im Vergleich höhere Auszugskräfte. Dieses Verhalten entspricht den Erwartungen und spiegelt die bessere Anbindung zu der Matrix wieder. Die höchsten Kräfte erreicht der Schussfaden des PP-6x6 Gewebes. Im Vergleich zu dem Schussfaden des SBR-5x5 ist die Auszugskraft um 84 % auf 17,5 N/mm erhöht. Es liegen jedoch auch die höchsten Standardabweichungen bei dem PP-6x6 vor, was auf die partielle Aufspreizung des Rovings zurückzuführen ist, welche die Messungen beeinflusst (vgl. Tab. 23). Die gemessenen Auszugskräfte des PP-3x3 ähneln denen des PP-6x6, wobei auffällt, dass die Standardabweichungen we-

sentlich geringer sind. Dies kann durch das gleichmäßige Erscheinungsbild und den damit zusammenhängenden einheitlichen Aufbau des Gewebes erklärt werden.

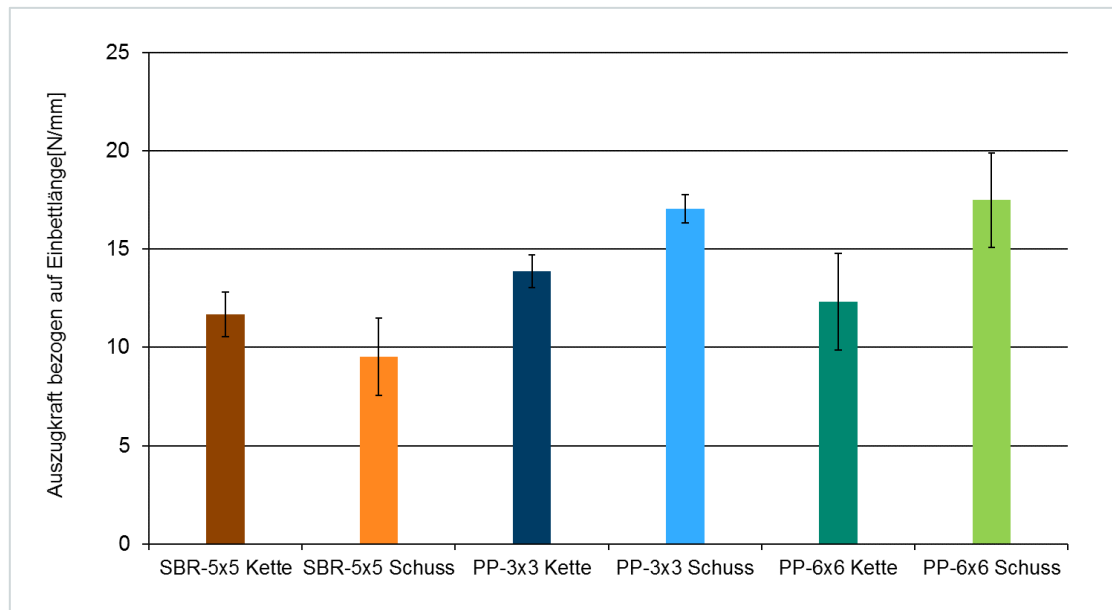


Abb. 80: Faserbündelauszugskraft für jeweils Kette und Schuss der unterschiedlichen Gittergewebe

Bewertung der Durchtränkung des Polymerüberzugs

Da die Mikroimprägnierung der Faserbündel von entscheidender Bedeutung für die Verbundfestigkeit ist, werden Makroschliffbilder des Fasermaterials im Ausgangszustand zur Beurteilung des Imprägnierungsgrades erstellt. In Abb. 81 sind Querschliffe der Kettfäden des SBR-5x5, PP-3x3 und PP-6x6 Gewebes dargestellt. Der Kettfaden des SBR-5x5 zeigt eine nahezu vollständige Imprägnierung, welche durch die hellen Stellen im Inneren des Bündelkerns gekennzeichnet ist. Die partiell auftretenden dunklen Stellen zeigen Hohlräume an, die auf eine unzureichende Mikroimprägnierung (Lufteinschlüsse) als auch auf ein vollständiges Fehlen einzelner Faserfilamente zurückzuführen sind. Der Kettfaden des SBR-5x5 besitzt außerdem eine kreisförmige Kontur, die eine gleichmäßige Lasteinleitung zulässt.

Im Vergleich zu dem SBR-5x5 sind die Gewebe mit PP-Infusion zwar bis in den Bündelkern imprägniert, jedoch im Fall des PP-6x6 auch mit markanten Fehlstellen versehen. Fehlstellen in der Größenordnung sind in der Regel auf das vollständige Fehlen von Faserfilamenten zurückzuführen (Abb. 81). Die Geometrie des Rovings ist erwartungsgemäß oval, was auf die bereits beschriebene hohe Webgeschwindigkeit in Kombination mit einer hohen Abzugsgeschwindigkeit und der zugehörigen Streckung der Filamente einhergeht. Die Lasteinleitung bzw. Kraftverteilung bei Lasteintrag ist hier ungleichmäßig zu erwarten. Aus den Schliffbildern wird deutlich, dass der Polymerüberzug jeweils die gesamten Einzelfilamente der Faserbündel durchtränkt und

nicht nur oberflächlich den Roving umhüllt. Von einer Kerbwirkung bedingt durch eine unzureichende Mikroimprägnierung ist somit nicht auszugehen. Lediglich einzelne Hohlräume im Faserbündel, wie bei dem PP-3x3 zu sehen, stellen eine potenzielle Schwachstelle für den späteren Verbundwerkstoff dar. Es ist zu erwarten, dass durch den Temperatureinfluss sowie den Nachdruck im Spritzgussprozess eine Reduktion der Hohlräume erfolgt.

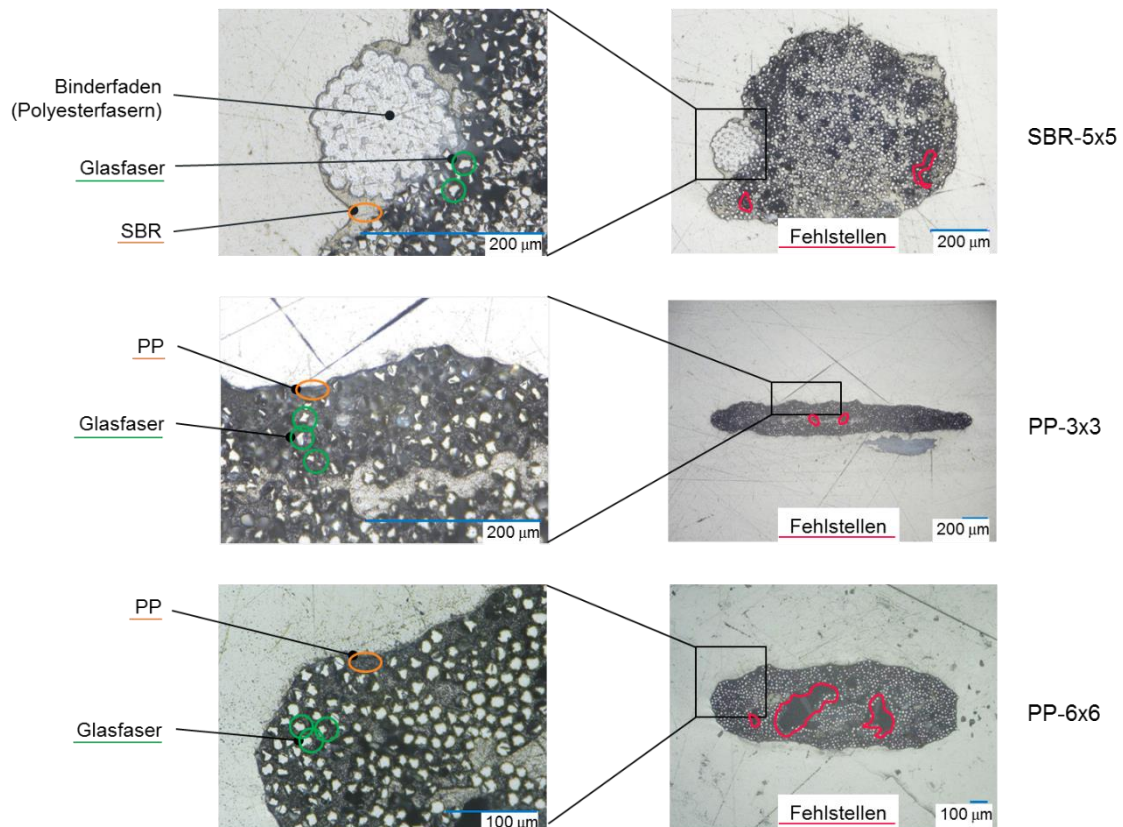


Abb. 81: Makroschliffbilder des Gewebes mit SBR-Infusion; Kettfaden (oben) und Schussfaden (unten) [36]

5.2.5 Beurteilung der Eigenschaftscharakteristik von Gittergeweben

Für die Ermittlung des Verarbeitungsfensters steht die thermische Analyse mittels TGA und DSC im Vordergrund. Es kann ein Verarbeitungs-/ Preformfenster von 140°C festgelegt werden, ohne dass eine Beschädigung der Fasern oder deren Schlichte eintritt. Die ermittelten Rückstände aus der TGA zeigen für Kett- und Schussfäden bei SBR-5x5 und PP-3x3 Werte von > 83 %. Das PP-6x6 hingegen besitzt einen unterschiedlichen Kett- und Schussfadenanteil, der zwischen 83 % (Kette) und 76 % (Schuss) variiert, obwohl für beide Systeme der gleiche Roving verwendet wird. Als möglicher Einflussfaktor ist die Kontur des Schussfadens anzuführen und die damit bedingte größere Oberfläche während der Analyse, die einen verstärkten Materialabbau zulässt. Die Eigenschaftscharakteristik der Gewebe wird bezüglich der Drapierfähigkeit über einen Scherrahmenversuch, den Drapetest sowie einer Drapierung am lasergesinterten Model unter-

sucht. Sowohl der Drapetest als auch der Scherrahmenversuch zeigen, dass eine Faltenbildung bei Scherung im SBR-5x5 Gewebe auf Grund der besonderen Bindungsart (Drehergewebe) nicht auftritt. Ebenfalls stimmen die Ergebnisse darin überein, dass eine Faltenbildung bei dem Leinwandgewebe PP-3x3 ab ca. 6° und bei PP-6x6 ab ca. 13° Scherwinkel einsetzt. Die Differenz der Scherwinkel ist auf die unterschiedliche Größe der von Kett- und Schussfäden gebildeten Gitter zurückzuführen. Die niedrigen Werte der kritischen Scherwinkel sind ein Zeichen für eine erhöhte Eigensteifigkeit bzw. Verschiebefestigkeit, die durch die thermisch fixierten Bindungspunkte hervorgerufen wird. Dies bestätigt auch die hohe gemessene Verformungskraft während der Drapierung im Drapetest. Der Drapetest offenbart zusätzlich eine Veränderung der Gitterlochgröße, die eine Durchflutbarkeit des kurzglasfaserverstärkten Spritzgussmaterials bis zu einer Verformung von 50 mm zulässt. Die Drapierbarkeit am lasergesinterten Modell zeigt, dass das Gewebe SBR-5x5 eine hohe Verschiebestabilität aufweist. Demgegenüber stehen die PP-infundierten Gewebe, die eine Abhängigkeit zum Dapierradius zeigen. Es gilt je kleiner der Radius, desto größer die Verschiebung der Einzelfasern im Roving. Demnach muss die zu drapierende Bauteilgeometrie angepasst und mit möglichst großen Radien versehen werden. Neben der Verschiebung steht jedoch die Vermeidung einer Faserschädigung im Fokus, sodass für die faserverbundgerechte Abänderung der Werkzeugkonstruktion in Kapitel 5.5.2 ein Dapierradius von ≥ 14 mm vorgesehen wird.

Entgegen den Erwartungen weist das PP-6x6 Gewebe in Abhängigkeit der belasteten Fläche die höchste Gewebezugfestigkeit auf. Das SBR-5x5 zeigt ähnliche Kennwerte, obwohl es auf einer anderen Glasfaserart basiert. Die geringste Gewebezugfestigkeit besitzt das PP-3x3 mit einer durchschnittlichen Differenz zum PP-6x6 von ~ 50 MPa. Bezogen auf die Einzelfaserzugfestigkeiten (Kapitel 5.1.3) ist der Faserausschöpfungsgrad bei dem Gewebezugversuch gering. Grund hierfür ist, dass die Zugbelastung nicht auf jedes einzelne Filament des Rovings übertragen werden kann und somit eine ungleichmäßige Belastung entsteht. Das Potential der einzelnen Fasern kann folglich nicht im gesamten Roving ausgenutzt werden.

Die Imprägnierung der Faserbündel verläuft bei allen Gittergeweben vollständig bis in den Kern. Das SBR-5x5 und das PP-3x3 zeigen vereinzelt fehlende Faserbündel im Schussfaden, die verarbeitungsbedingt auftreten und zu vernachlässigen sind. Das PP-6x6 hingegen besitzt große Fehlstellen, die ca. ein Viertel des Rovings ausmachen. In diesem Ausmaß stellen die Fehlstellen potenzielle Schwachstellen für den späteren Verbundwerkstoff dar. Es ist zu prüfen, ob durch Temperatur- und Nachdruckregelung im Spritzgussprozess eine Komprimierung der Rovings und somit eine Minimierung der Fehlstellen möglich ist. Die gemessene Faserbündelauszugskraft bestätigt die Ergebnisse des Single-Fibre Pull-Out und zeigt, dass die PP-Infusion eine bes-

sere Interaktion mit der Spritzgussmatrix aufweist, als die SBR-Beschlichtung. Folglich ist auch eine bessere Performance der Gewebe PP-3x3 und PP-6x6 im Verbund zu erwarten.

Obwohl das Gewebe PP-3x3 die beste Interaktion zu der Spritzgussmatrix sowie die höchsten mechanischen Kennwerte aufweist, kann das Verhalten der Leinwandbindung im Spritzguss nicht anhand der bisherigen Ergebnisse bewertet werden. Die Drapierfähigkeit, speziell die Faltenbildung im Scherversuch, zeigt die Nachteile der thermischen Fixierung der Bindungspunkte im Leinwandgewebe. Auf Grund der hohen Viskosität und der Spritzdrücke wird demnach die Verarbeitung zu Musterplatten mit allen drei Geweben weitergeführt. Tab. 28 vergleicht die Eigenschaften der unterschiedlichen Gewebe.

Tab. 28: Übersicht der Gewebeeigenschaften im Vergleich (- \triangleq gering; ++ \triangleq hoch)

	SBR-5x5	PP-3x3	PP-6x6
Zugeigenschaften	+	-	++
Drapierfähigkeit	+	-	+
Imprägnierungsqualität	+	++	-
Faser-Matrix Interaktion	-	+	+

5.3 Erkenntnisse aus der Musterplattenherstellung

Abb. 82 zeigt den Entwicklungsschritt der Verarbeitung der Gittereinleger in einer eindimensionalen Plattengeometrie. Dieser Schritt ist essenziell, da er die ersten belastbaren Ergebnisse der Performance des Faserverbunds liefert. Neben den Handlings- und Verarbeitungseigenschaften tragen die erzielten Kennwerte zu der Auslegung des Beispielbauteils KUM bei. Ebenso lassen die Ergebnisse auf etwaiges Optimierungspotential bei den Einlegervarianten schließen.

Erarbeitung des Substitutionspotentials

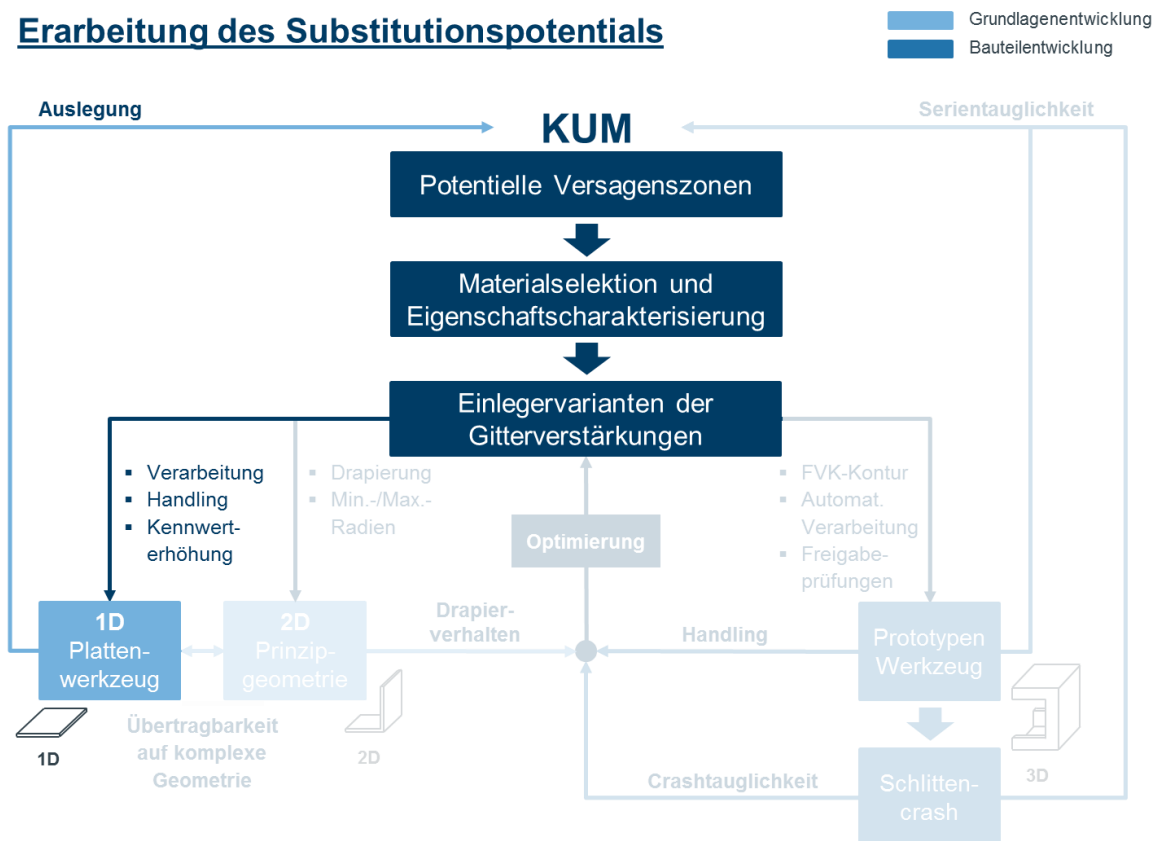


Abb. 82: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Verarbeitung und Handling im 1D-Plattenwerkzeug und Untersuchung der Kennwerterhöhung

In dem folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der Plattenmusterung dargestellt. Die Musterung wird primär unter drei Gesichtspunkten beleuchtet:

- Werkzeugtemperatur
- Massetemperatur
- Einspritzgeschwindigkeit.

Neben einer geeigneten Parameterauswahl stehen die Einbetttiefe sowie der Einfluss unterschiedlicher Gewebeausrichtungen/-doppelungen im Vordergrund. Ebenfalls werden die Platten mit unterschiedlichen Angussarten gefertigt und mögliche Verschiebungen des Einlegers inner-

halb der FVK-Platte über CT untersucht. Die Verarbeitungsversuche werden mit dem SBR-5x5 Drehergewebe durchgeführt, da dieses zum aktuellen Zeitpunkt kommerziell verfügbar ist und eine gleichbleibende Qualität und Homogenität aufweist, die zur Vermeidung weiterer Einfluss-/Störfaktoren beiträgt.

5.3.1 Musterungsauffälligkeiten mit einfacher und doppelter Lage

➤ Einfache Lage

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Versuchsnummern 1, 2, 5 und 6 (vgl. Tab. 13) sowohl mit als auch ohne Einleger in der Kavität die besten Ergebnisse hinsichtlich einer optischen Begutachtung erzielen. Die Faktoren wie Umschaltzeitpunkt, Nachdruck und Kühlzeit ergeben sich aus den gewählten Parametern. Der Punktanguss führt über die radiale Ausbreitung der Matrix zu einer isotropen Ausrichtung der Kurzglasfasern. Durch die Fixierung des Gewebes auf der beweglichen Seite und den zentralen Punktanguss, wird das Gewebe an die Oberfläche der entstehenden Platte gedrückt. Eine Einbettung in die neutrale Phase ist im ersten Schritt nicht möglich. Damit dennoch ein Abstand zwischen Kavitätswand und Gewebeeinleger entsteht, werden Bereiche des Einlegers gezielt mit einer weiteren Lage Gewebe versehen. Diese Maßnahme erzielt jedoch nur in unmittelbarer Nähe der Verstärkung den gewünschten Effekt. Die über einen Filmanguss erstellten Proben zeigen auf der Oberfläche der festen Werkzeughälfte eine glänzendere Oberfläche, als die Proben mit dem Direktanguss. Der höhere Glanzgrad ist bei gleicher Einspritzgeschwindigkeit, Werkzeug- und Massetemperatur auf die zusätzlich eingebrachte Scherung durch den Filmanguss zurückzuführen. Diese führt zu einer verringerten Viskosität bei Werkzeugfüllung und zu einem veränderten Kristallisationsverhalten. Ebenfalls besitzen die Platten auf Grund der Angussform eine gerichtete Kurzfaserausrichtung entlang der Scherzonen, die erwartungsgemäß zu höheren mechanischen Kennwerten führt, wie sie ebenfalls von GUPTA [97], JOHANNABER [98] und TRUCKENMÜLLER [99] beschrieben werden. Die Abhängigkeit der Faserausrichtung auf die mechanischen Kennwerte wird in Kapitel 5.4.2 nochmals aufgegriffen und diskutiert. Es ist anzunehmen, dass die Proben auch durch die bessere Oberflächengüte höhere Materialkennwerte erreichen. Ein Umfließen und Einbetten in die neutrale Lage ist jedoch auch bei diesem Anguss nicht möglich. Abb. 83 zeigt beispielhaft eine Platte mit Filmanguss als Foto (links) und als CT-Aufnahme (rechts). Obwohl die SG-Matrix über den Querbalken gestaut und über eine einheitliche Front angeströmt wird, zeigt das CT, dass die einfache Lage Gittergewebe ohne Verschiebung über einen Filmanguss angespritzt werden kann.

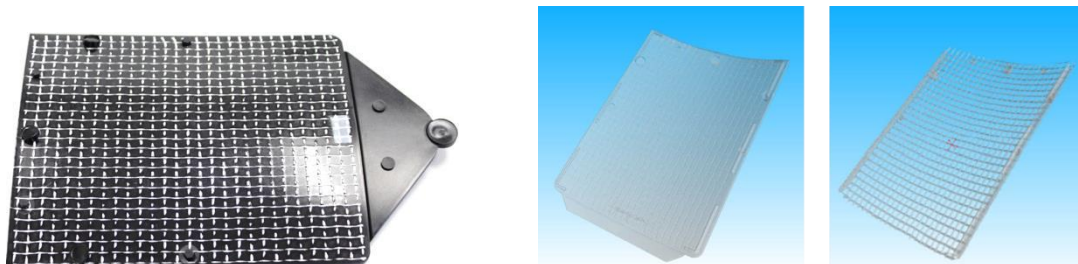


Abb. 83: Platte mit einlagigem SBR-5x5 Gewebe; Foto (links) und CT-Aufnahme (rechts) [59]

➤ Doppelte Lage

Für das vollkommene Umfließen von mindestens einer Gewebelage wird der Ansatz gewählt, zwei Gewebelagen in die Kavität einzubringen. Außerdem wird der Einfluss auf eine mögliche Erhöhung der mechanischen Kennwerte betrachtet. Die Gewebezuschneitte ($0/90^\circ$) werden übereinandergelegt, mit einem doppelseitigen Klebeband partiell miteinander fixiert und anschließend in der Kavität positioniert. Die Verarbeitung erfolgt im ersten Versuch mit Punktanguss und den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Parametern. Trotz einer doppelten Gewebelage weisen die gefertigten Platten einen starken Verzug auf. Die Gewebe haben sich nicht gleichmäßig an Vorder- und Rückseite der Kavität gelagert, sondern befinden sich außenzentrisch der Plattendicke. Um verzugsfreie Platten herzustellen wird in einem zweiten Versuch ein Ausschnitt in Höhe des Angusses von der Gewebelage auf der Düsenseite entfernt. Dabei wird die Gewebelage der beweglichen Seite während des SG-Prozesses an die Kavität gedrückt. Durch den entstandenen Freiraum innerhalb der Ebene kann nun die einfließende Schmelze die zweite Gewebelage auf die Düsenseite drücken. Das Resultat ist eine nahezu verzugsfreie Platte mit doppelter Verstärkung (Abb. 84). Neben der Formstabilität ist auch die Einbettung beider Gewebelagen tendenziell besser, als bei einer Lage.

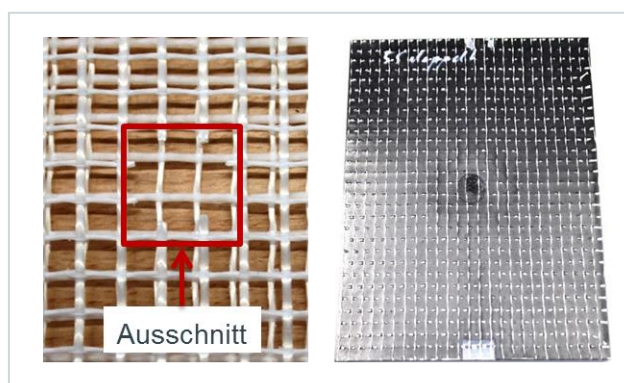


Abb. 84: Ausschnitt Doppelgewebelage (links) und verzugsfreie Platte $0/90^\circ$ (rechts) [47]

Bei einer Probenausrichtung von $\pm 45^\circ$ sind mit steigenden Spritzgeschwindigkeiten von 20, 55, und 110 mm/s unterschiedliche Effekte in der Platte zu erkennen (Abb. 85). Während die Platte mit 20 mm/s sehr starke Faserverschiebungen vom Anspritzpunkt bis zum Rand der Platte zeigt, nimmt dieser Effekt bei 55 mm/s bereits deutlich ab. Die Musterplatte mit der höchsten Einspritzgeschwindigkeit zeigt lediglich die Verschiebung eines einzelnen Rovings. Es ist zu vermuten, dass die Rovings als eine Art Widerstand fungieren und Staueffekte bilden. Diese werden bei erhöhter Matrixviskosität, welche aus der geringen Einspritzgeschwindigkeit resultiert, begünstigt. Positive Auswirkung hat dieser Effekt auf die Wirtschaftlichkeit des Verarbeitungsprozesses, da durch schnellere Einspritzgeschwindigkeiten ebenfalls die Taktzeiten des Herstellprozesses sinken. Es sei jedoch angemerkt, dass mit steigender Geschwindigkeit auch die Scherbelastung innerhalb des Materials steigt, was zu einer Ausrichtung und Streckung der Molekülketten, aber ggf. auch zum Materialabbau führen kann.

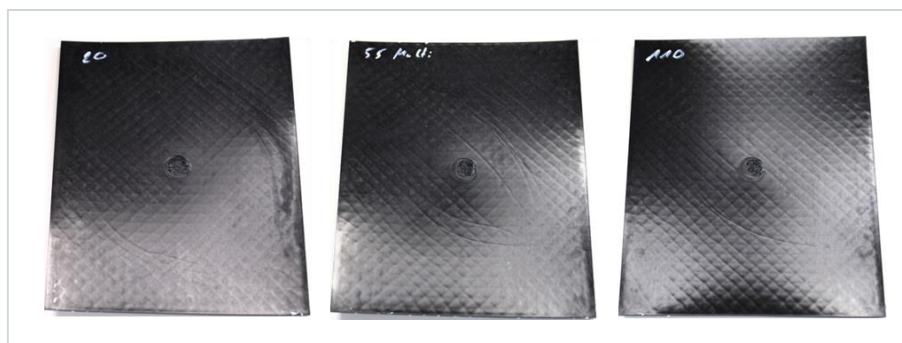


Abb. 85: Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit bei doppelter Gewebelage und $\pm 45^\circ$ Ausrichtung; 20 mm/s (links), 55 mm/s (mitte), 110 mm/s (rechts) [47]

Für die Verarbeitung der doppelten Gewebelagen mit Filmanguss werden die Gewebe wie im ersten Versuch zugeschnitten, aneinander fixiert und in der Kavität positioniert. Es ist zu erkennen, dass vermehrt Faserdelokationen auftreten. Ebenfalls fallen undefinierte Über- und Durchflutungen der Gewebeeinleger auf, die sich auf die geforderte Wiederholbarkeit im Serienprozess negativ auswirken. Um die Ursache der auftretenden Merkmale zu untersuchen werden die Platten einer zerstörungsfreien Röntgenuntersuchung (CT) unterzogen. Im CT (siehe Anhang) ist zu sehen, dass sich eine Gewebelage großflächig von ihrer Ursprungsposition gelöst und eine Art Knäuel in der Plattenmitte gebildet hat. Trotz der hohen Verschiebefestigkeit des Drehergewebes ist der entstehende Druck auf das Gewebe in der Kavität ausreichend groß, um Teile des Gewebes zu verschieben. Es ist zu vermuten, dass sich die Kurzfasern der Matrix an den Schussfäden quer zur Strömungsrichtung aufstauen. Hierdurch würde eine Art Filtereffekt entstehen. Eine CT-Detailaufnahme zeigt jedoch keine Aufstauung in unmittelbarer Nähe der Rovings. Lediglich

eine Umlenkung der Strömung um das Knäul lässt sich an der Orientierung der Kurzfasern erkennen. Dies könnte ein Grund für die undefinierte Über- und Durchflutung sein. Im Gegensatz zu den Platten mit Punktanguss kann eine Variation der Einspritzgeschwindigkeit keine Verbesserung der Plattenqualität erzielen. Eine Verarbeitung von doppelten Gewebelagen mit Filman-guss im Serienprozess ist demnach auszuschließen.

5.3.2 Einfluss der Angussarten auf die mechanischen Eigenschaften

In diesem Kapitel wird die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Angussart geprüft. Die relativen Kennwerte werden am Beispiel der Zugfestigkeit anhand der Gewebeaus-richtung KA (Kettfäden außen) und SI (Schussfäden innen) sowie an der reinen Matrix gegen-übergestellt. Abb. 86 veranschaulicht die Auswirkung des Angussystems auf die Kenngrößen Zugfestigkeit und Zugmodul. Als Referenz werden die Festigkeit und der Modul der Spritz-gussmatrix im Punktanguss auf 100 % gesetzt.

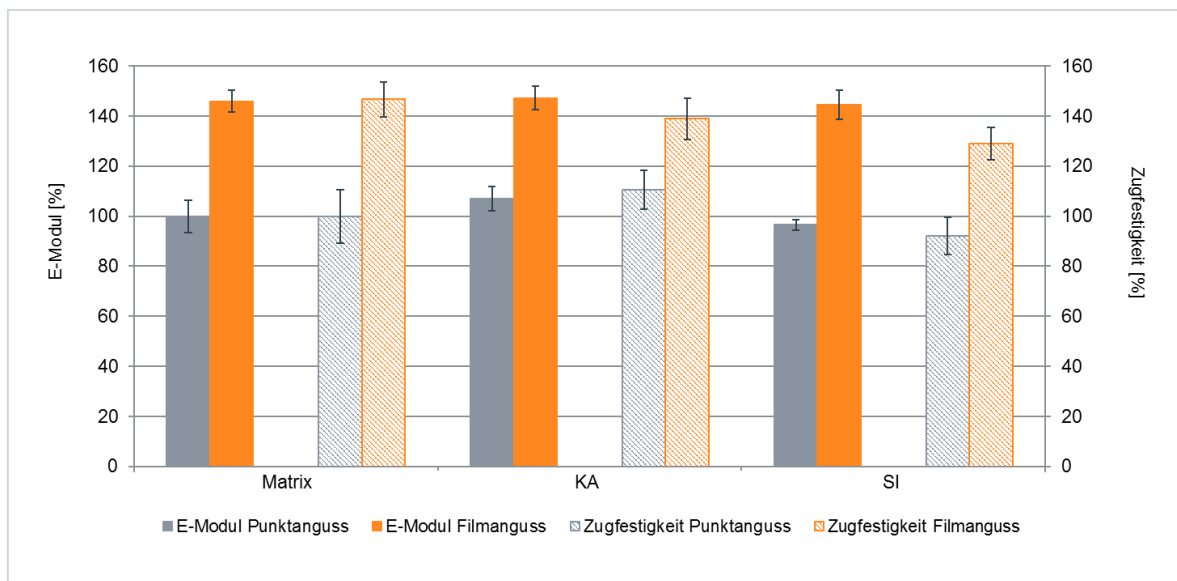


Abb. 86: Einfluss der Angussarten mit Gewebeausrichtung KA und SI am Beispiel des Zugversuchs [47]

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Platten mit Filmanguss deutlich höhere mechanische Kennwerte aufweisen, als die Platten mit Punktanguss. Dies ist auf die ausgerichteten Kurzfasern innerhalb der Spritzgussmatrix zurückzuführen und spiegelt sich bspw. im ~40 % höheren E-Modul wieder. Die niedrige Streuung der Ergebnisse spricht für eine gleichmäßige Materialqua-lität von Matrix und Gewebe sowie für eine hohe Reproduzierbarkeit des Spritzgussprozesses. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Verstärkungen mit Kett- (KI) und Schussausrichtung (SA) ist die Verstärkungswirkung des Gittergewebes in beiden Fällen als minimal zu bewerten.

Eine Abhängigkeit der Prüfrichtung (Kette oder Schuss) ist lediglich im Streuungsbereich zu beobachten.

5.3.3 Einfluss von Gewebeausrichtung, –dopplung und TFP-Verstärkung auf die mechanischen Eigenschaften

Nachfolgend wird der Einfluss von Gewebeausrichtung und –dopplung auf die mechanischen Eigenschaften hin untersucht. Die Kennzahlen werden hierbei relativ in Prozent dargestellt. Die Ergebnisse gliedern sich nach den beiden genutzten Angussarten und nach der Ausrichtung der Einleger. In Abb. 87 sind die Zugfestigkeit und der Zugmodul der Platten mit unterschiedlichen Gewebeausrichtungen (vgl. Tab. 14) am Beispiel des Punktangusses zu sehen. Als Referenz ist PP-GF30 unter der Bezeichnung *Matrix* aufgeführt.

Es ist zu sehen, dass die Platten mit einlagiger Verstärkung und Prüfrichtung entlang der Kettfäden erwartungsgemäß die höchsten Kennwerte aufweisen. Die Kettfäden werden zum einen nicht so stark während des Webprozesses beansprucht, sodass lediglich geringe Faserschädigungen vorliegen. Zum anderen ergibt sich durch den Binderfaden eine zusätzliche Verstärkung, die die Belastung im Verbund aufnimmt. Die Lage KI ist dabei gegenüber KA zu bevorzugen, auch wenn die Verbesserung von Steifigkeit und Zugfestigkeit nur marginal sind.

Die gemessenen Werte in Schussrichtung zeigen ein gegenteiliges Verhalten. Hier liegen die Werte für die Einzelverstärkungen in Schussrichtung unter den Kennwerten des reinen Matrixmaterials. Auf Grund der erhöhten Beanspruchung während des Webvorgangs und der verstärkten Ondulation ist dies zu erwarten. Es ist zu untersuchen, ob die Grenzfläche der eingebetteten Schussfäden als Sollbruchstelle fungiert. Dies wird innerhalb des Kapitels 5.4.2 aufgegriffen und diskutiert.

Die doppellagigen Varianten zeigen Festigkeitswerte, die sich im Bereich der reinen Matrixreferenz befinden, obwohl mit einer doppelten Lage auch der Endlosfasergehalt verdoppelt wird. Auffällig ist, dass auch die Platten mit Ausrichtung KA +45/-45 keinen eindeutigen Unterschied der Zugfestigkeit oder des E-Moduls im Vergleich zu den übrigen Platten aufzeigen, obwohl die Kraft nicht direkt entlang des Gewebes eingeleitet werden kann. Die verzugsfreie Variante SI + KI (jeweils außen) liegt sogar unterhalb der 100 % Referenz und kennzeichnet damit das schlechteste Ergebnis der Proben mit doppelter Verstärkung. Diese Ergebnisse entsprechen nicht den Erwartungen und falsifizieren in diesem Anwendungsfall die These, dass bei erhöhtem Faserservolumenanteil im Verbund die mechanischen Kennwerte steigen. In vorliegendem Beispiel sind die geringen Kennwerte der doppellagigen Verstärkung auf die ungenügende Einbettung der

Gittergewebe zurückführen. Die Einbettung geht mit der festgelegten Wandstärke der Spritzgussplatte einher und resultiert in einer unzureichenden Kraftübertragung. Somit kann das Verstärkungspotential der Fasern nur bedingt genutzt werden. Zusammenfassend lässt sich für den Punktanguss festhalten, dass der Aufwand für die Herstellung einer doppelagig verstärkten Platte nicht im Verhältnis zur Performancesteigerung bei Zugbelastung steht.

Im Vergleich mit den Ergebnissen des Punktangusses, zeigen die Platten mit Filmanguss ein ähnliches Verhalten. Die anisotrope Kurzfaserausrichtung der Matrix sorgt im Allgemeinen für ein höheres Kennwertniveau, als bei den hergestellten Platten mit Punktanguss. Die gemessenen Zugfestigkeiten und Module der Platten mit einlagiger Verstärkung divergieren nur marginal innerhalb des Streubereichs der Matrix, während bei der doppelagigen Variante KA $\pm 45^\circ$ ein deutlicher Abfall zu erkennen ist. Dieser Effekt ist erwartungsgemäß und liegt darin begründet, dass die Zugkräfte nicht längs der Faserrichtung in das Gewebe eingeleitet werden können. Die Doppellage SI+KI (jeweils außen) zeigt mit einem Anstieg des E-Moduls um $\sim 10\%$ und einer gesteigerten Zugfestigkeit um ca. 11% die höchsten Werte, die in Zugrichtung erreicht werden. Der erhöhte Aufwand zur Herstellung doppelagiger Platten mit Filmanguss und die in Kapitel 5.3.1 beschriebene Problematik der Gewebeverschiebungen stehen jedoch in keinem Verhältnis zu den erreichten Kennwerten. So lässt sich auch für den Filmanguss festhalten, dass die Herstellung von doppelagigen Platten nicht wirtschaftlich ist.

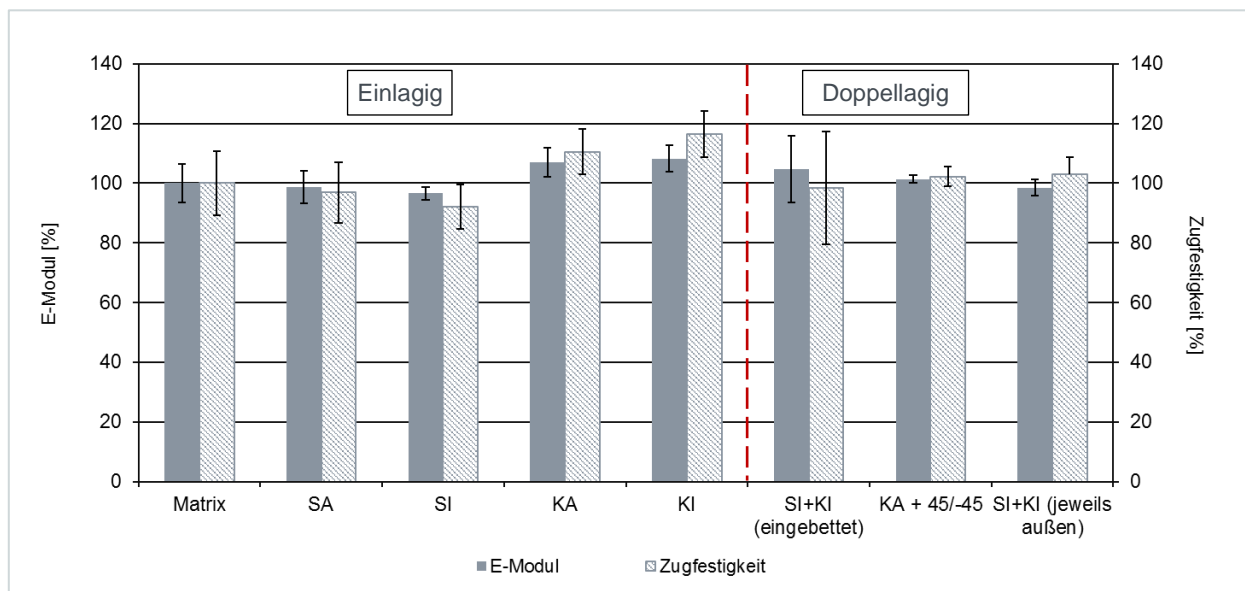


Abb. 87: Abhängigkeit der Gewebeausrichtung an Platten mit Punktanguss am Beispiel des Zugversuchs [47]

TFP-Verstärkungen

Bei den TFP-Verstärkungen ist ein ähnliches Verhalten, wie bei den doppelten Gewebelagen zu beobachten. Die platzierten Verstärkungen wirken als eine Art Staubalken für die hochgefüllte

Spritzgussmasse. Durch diesen Staueffekt werden die Verstärkungsfasern teilweise zusammengeschoben und liegen nicht mehr ausgerichtet vor. Demzufolge ist auch hier eine hohe Einspritzgeschwindigkeit in Verbindung mit einer niedrigen Viskosität der Spritzgussmasse erforderlich. Um einen möglichst hohen Verstärkungseffekt nachzuweisen, werden nur die Gitter mit 0,5 mm Verstärkungsabstand und Ausrichtung in 0° (Belastung entlang der TFP-Verstärkung) mechanisch getestet.

Die Ergebnisse des Zug- und Durchstoßverhaltens der TFP-verstärkten Platten sind in Abb. 88 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die einfache Gitterverstärkung (KI) im Vergleich zur Matrix nur geringfügige Verbesserungen im Zugversuch erzielt. Die Zugfestigkeit erhöht sich auf 116 %, während das E-Modul auf 108 % steigt. Die TFP-Verstärkung (KI+TFP) bewirkt hingegen eine Steigerung der Zugfestigkeit auf 135 % und des E-Moduls auf 124 %. Diese Steigerung ist auch bei der Durchstoßfestigkeit zu erkennen. Hier erfolgt eine Steigerung von 100 % der Matrix auf 120 % (KI) und 142 % (KI+TFP). Es fällt jedoch eine relativ hohe Streuung bei den gemessenen Durchstoßfestigkeiten auf. Diese liegt in der Positionierengenauigkeit der Probekörper und der konischen Form des Druckstempels begründet. Der Stichversuch zeigt, dass eine zusätzlich aufgebrachte Verstärkung aus Carbonrovings eine sichtbare Steigerung der mechanischen Kennwerte erzielt. Der zusätzliche Materialaufwand sowie der hinzukommende Verarbeitungsschritt verringern jedoch den wirtschaftlichen Vorteil der eingesetzten Gitter.

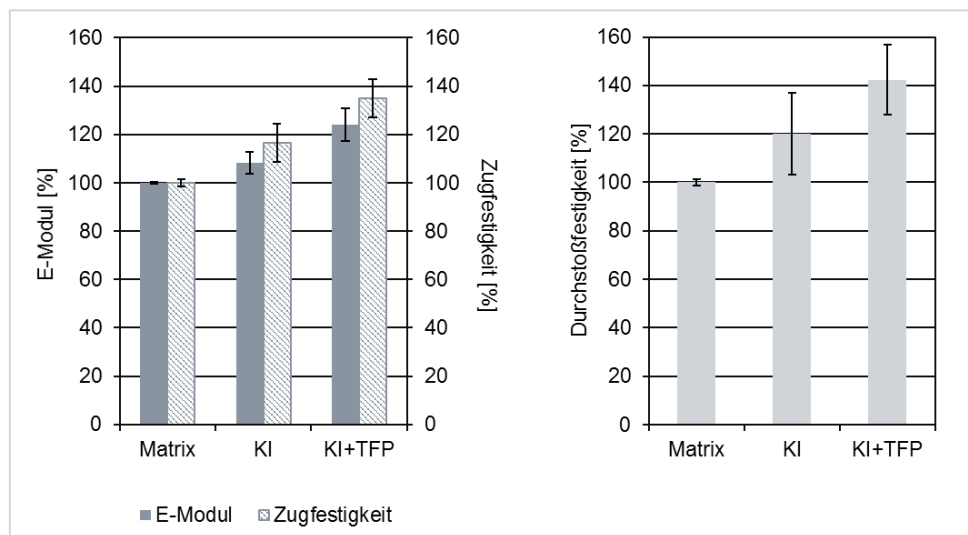


Abb. 88: Vergleich des Verstärkungseffekts von Matrix, einfachem Gitter (KI) und TFP-verstärktem Gitter (KI+TFP) anhand des Zug- und Durchstoßversuchs

5.3.4 Beurteilung der Erkenntnisse aus der Plattenmusterung

Die Grundsatzversuche der Plattenmusterung zeigen, dass sich einlagige Gewebe einfach im Werkzeug positionieren und ohne Faserdelokalisationen anspritzen lassen. Dabei ist die Qualität

der Platten unabhängig vom Angussystem. Das Anspritzen von doppelten Gewebelagen ist ohne gezielte Gewebeausschnitte und/oder Verklebungen weder über Punkt- noch über Filmanguss reproduzierbar. Die Einbettung der doppelten Gewebelagen ist auf Grund der festgesetzten Plattenwandstärke ungenügend, was zu einer unzureichenden Kraftübertragung führt. Folglich kann das Verstärkungspotential nicht ausgeschöpft werden. Eine weitere Herausforderung, die nicht näher untersucht wurde, stellt die Drapierung von doppelten Lagen über die spätere Bauteilkontur dar. Es ist zu erwarten, dass die Eigensteifigkeit der Einleger den Einsatz von Doppellagen im automatisierten SG-Prozess erschwert. Folglich steht der aufzubringende Vorbereitungs- und Verarbeitungsaufwand in keinem Verhältnis zu der Verstärkungswirkung der Doppellagen.

Der Vergleich der Kennwerte in Abhängigkeit der Gewebeausrichtung bei einlagiger Verstärkung zeigt, dass die Varianten KI in Kettrichtung und SA in Schussrichtung die besten Ergebnisse erzielen. Vor diesem Hintergrund werden die weiteren Musterplatten lediglich mit einer Gittergewebelage in zuvor genannten Ausrichtungen verstärkt.

Der Stichversuch mit TFP-verstärkten Einlegern in 0° Ausrichtung und 0,5 mm Verstärkungsabstand zeigt eine deutliche Steigerung der Zug- und Durchstoßfestigkeit gegenüber dem reinen Matrixmaterial. Der erhöhte Materialaufwand und der zusätzliche Prozessschritt sind jedoch als Nachteil anzuführen, sodass die TFP-Verstärkung für einen Einsatz in der Serie nicht weiter in Betracht gezogen wird.

5.4 Eigenschaftsbestimmung der gewebeverstärkten Musterplatten

Für eine umfangreiche Charakterisierung der Musterplatten werden einlagig verstärkte Platten nach den in Kapitel 5.3.4 erschlossenen Erkenntnissen hergestellt. Zusätzlich zu dem SBR-5x5 werden die Gittergewebe PP-3x3 und PP-6x6 verarbeitet. Um den Anteil der Gittergewebeverstärkung und somit den Verstärkungsgrad innerhalb der Musterplatten zu ermitteln, wird in einem ersten Schritt der gewichtsbezogene Glasfaseranteil über die Veraschungsmethode bestimmt. Weiterhin erfolgt eine Überprüfung der Grenzflächen zwischen SG-Matrix und Einleger, die eine Aussage über die Faser-Matrix Interaktion und das mechanische Verhalten im Verbund zulassen und einen Abgleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.1 bilden. Die Eigenschaften der FVK-Platten werden statisch (Zug-, Biegebeanspruchung) und dynamisch (Schlag-, Durchstoßbeanspruchung) getestet. Die Untersuchungen bilden die Basis für eine Einschätzung der voraussichtlichen Performance im Serienbauteil KUM und decken bereits auf Plattenebene Stärken und Schwächen des Verbunds auf.

5.4.1 Thermische und optische Analyse mittels Veraschungsmethode und Makroschliffbildern

In diesem Kapitel wird der prozentuale Masseanteil an Endlosfasern innerhalb der Musterplatten mit unterschiedlichen Verstärkungen ermittelt. Weiterhin werden Makroschliffbilder zur Untersuchung der Faser-Matrix Grenzfläche erstellt.

Glasfaseranteil mittels Veraschungsmethode

In Abb. 89 sind die Proben vor und nach der Veraschung zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die Matrix vollständig zersetzt und die reinen Fasereinleger inklusive Kurzglasfasern zurückbleiben. Die ermittelten prozentualen Faseranteile der Musterplatten sind in Tab. 29 dargestellt. Das Rohmaterial ohne Endlosfaserverstärkung besitzt 30,6 wt.% Kurzfasern und entspricht in etwa den Herstellerangaben. Die Glasfaseranteile der Proben mit Gitterwebe weisen mit zunehmendem Gitterabstand einen Anteil von 35,7 wt.% (PP-3x3), 34,9 wt.% (SBR-5x5) und 33,9 wt.% (PP-6x6) auf. Es ist zu erwarten, dass der Glasfaseranteil in direktem Verhältnis zu den mechanischen Eigenschaften steht, wie es unter anderem von FLEMMING ET AL. in [61] beschrieben wird. Obwohl der Anteil an Endlosfasern gering erscheint, ist auf Grund der in Kapitel 5.1.2 nachgewiesenen Faser-Matrix Interaktion von einer Performancesteigerung auszugehen.



Abb. 89: Veraschungsmethode – Proben vor und nach der Veraschung [36]

Tab. 29: Glasfaseranteil unterschiedlich verstärkter Platten [36]

Material	Glasfaseranteil [%]	davon Endlosfaser [%]
Matrix	30,64	0
SBR-5x5	34,95	4,81
PP-3x3	35,71	6,02
PP-6x6	33,97	3,52

Makroschliffbilder

Die optische Bewertung des Grenzflächenübergangs zwischen Infusionsmaterial und der Matrix erfolgt mittels Makroschliffbildern. Abb. 90 zeigt eine beispielhafte Aufnahme von einem SBR-5x5 Kettfaden und einem PP-3x3 Kettfaden in der Übersicht (oben) und im Detail (unten). In der Vergrößerung ist bei dem Gitter mit SBR-Beschichtung eine klare Grenzfläche zwischen Roving und Matrix zu erkennen. Eine Vermischung der Materialien findet nicht statt. Dies lässt sich nicht zuletzt damit begründen, dass der Kautschuk-Überzug als Elastomer keinen Schmelzpunkt und keine Kompatibilität zur SG-Matrix aufweist. Bei der Aufnahme des PP-3x3 ist der Übergang zwischen der PP-Infusion und dem Matrixwerkstoff nicht klar abzugrenzen. Es entsteht ein fließender Übergang. Ausschlaggebend dafür ist der niedrige Schmelzpunkt der PP-Infusion (vgl. Abb. 69), welcher mit 141°C unterhalb der Verarbeitungstemperatur des Matrixmaterials von 245°C liegt. Die Infusion schmilzt lokal auf und die Werkstoffe vermischen bzw. verbinden sich an der Grenzfläche. Im Vergleich zur SBR-Infusion ist somit von einer verbesserten Faser-Matrix bzw. Infusions-Matrix Haftung auszugehen. Weiterhin sind auf den Übersichtsbildern keinerlei Lufteinschlüsse oder Hohlräume zu erkennen, was die These aus Kapitel 5.2.4 bestätigt, dass durch den Spritzdruck innerhalb der Werkzeugkavität eine Kompriemierung der Rovings und somit eine Schließung der Hohlräume stattfindet.

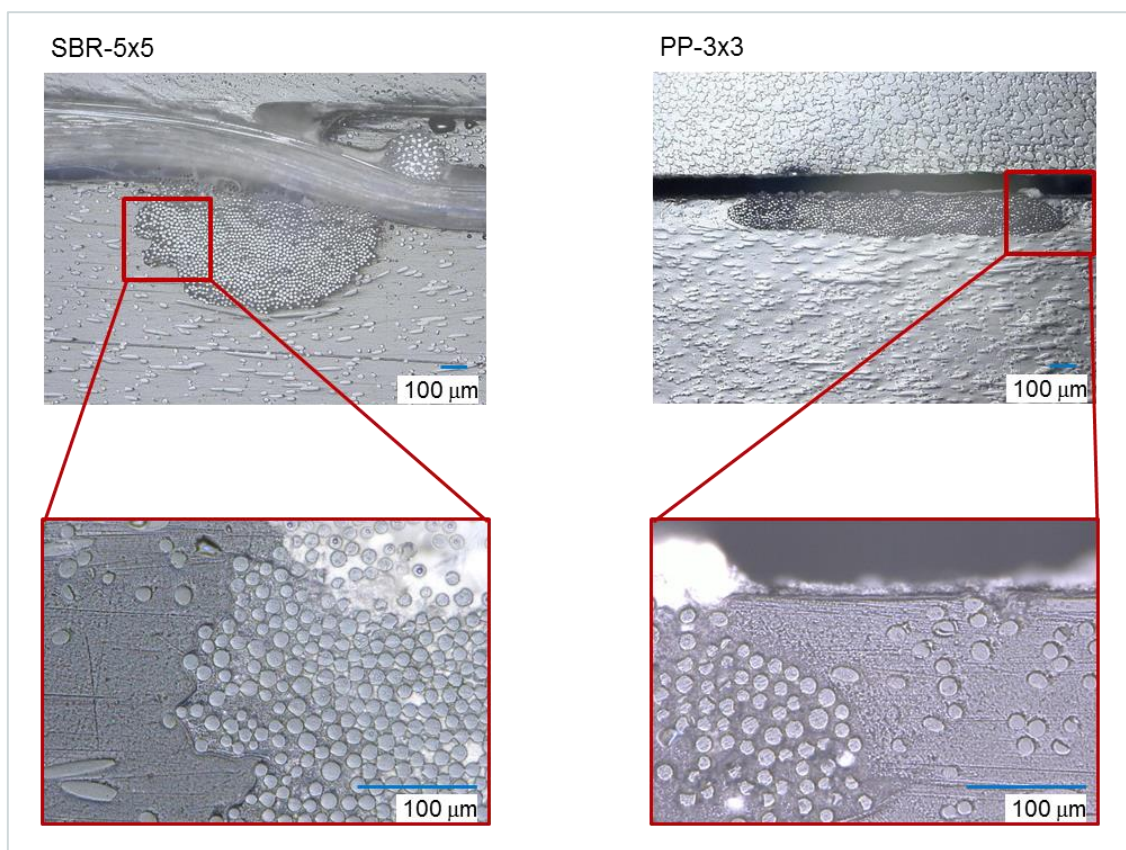


Abb. 90: Makroschliffbilder – Faserverstärkte Platten in der Übersicht (oben) und im Detail (unten) [36]

5.4.2 Statische Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden entsprechend des späteren Belastungsprofils im Serienbauteil analysiert. Für die (quasi-)statische Charakterisierung stehen insbesondere die Prüfung auf Zug- und Biegebeanspruchung im Vordergrund, welche die alltäglichen Belastungen im eingebauten Zustand im Automobil imitieren.

Zugversuch

In Abb. 91 sind der Zugmodul sowie die Zugfestigkeit dargestellt. Verglichen wird die Verstärkungswirkung der unterschiedlichen Gittergewebe in KI und SA Ausrichtung mit der reinen Spritzgussmatrix als Referenz. Die Matrix ohne Gittergewebe weist eine Zugfestigkeit von ~86 MPa sowie einen Zugmodul von 5860 MPa auf. Die Proben mit SBR-5x5 Gitter zeigen für die Kettrichtung (KI) eine vergleichbare Zugfestigkeit von ~83 MPa und für die Schussrichtung (SA) einen verringerten Wert von ~67 MPa. Dabei versagen die Proben jeweils in dem Bereich eines quer zur Beanspruchungsrichtung liegenden Faserbündels (vgl. Abb. 92). Es ist zu erwarten, dass die Kerbwirkung ausgehend von dem Faserbündel dieses Verhalten hervorruft. Ausschlaggebend ist in diesem Fall die Faser-Matrix Haftung und somit die Anbindung zwischen Beschlichtung und Matrix. Die gemessene Querkzugfestigkeit aus Kapitel 5.1.3 sowie die Ergebnisse des Single-Fibre Pull-Outs und der Makroschliffbilder sind ein Indiz für eine unzureichende Faser-Matrix Interaktion, wie sie auch MADHUKAR ET AL. [100] in ihren Untersuchungen beschreibt. Im Fall einer unzureichenden Faser-Matrix Haftung beobachteten sie ein vorzeitiges Bruchverhalten unter Zugbeanspruchungen. Der Bruch setzt quer zur Faserorientierung an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix ein. Durch eine geeignete Faservorbehandlung kann diesem entgegengewirkt werden. Im Rahmen dieser Arbeit bietet das PP-infundierte Gewebe eine geeignete Alternative.

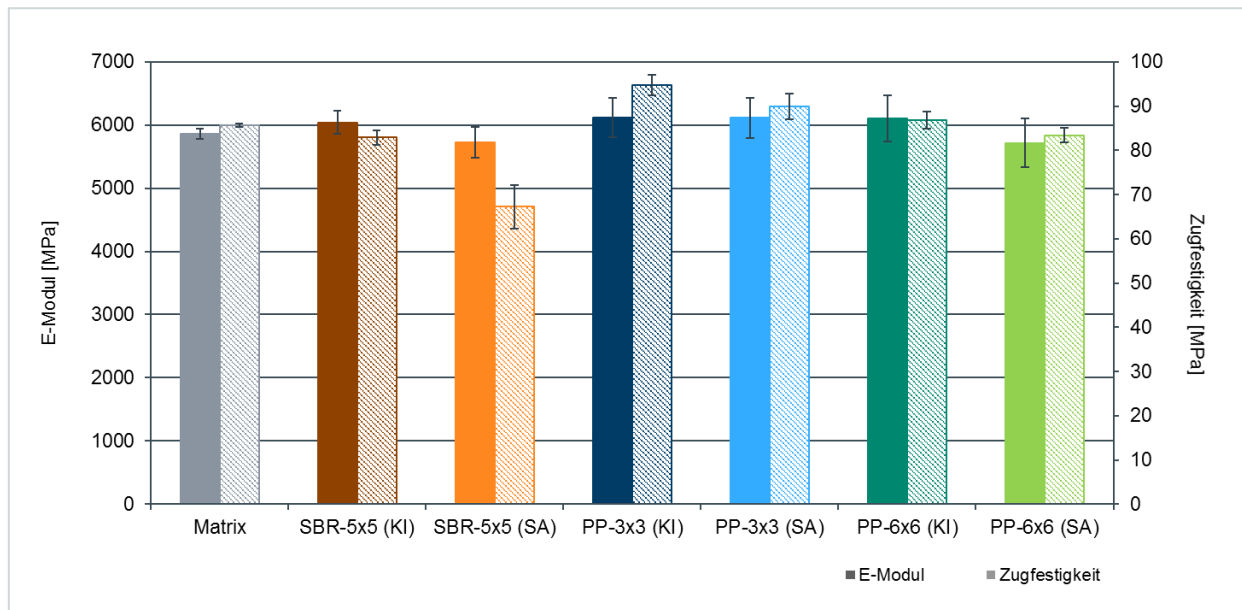


Abb. 91: Zugversuch – Vergleich der Verstärkungswirkung unterschiedlicher Gittergewebe in KI/SA Ausrichtung mit Filmanguss

Das Gewebe PP-3x3 zeigt eine Steigerung der Zugfestigkeit um ~10,5 % auf 94,7 MPa in Kett- richtung sowie um ~5 % auf 89,9 MPa in Schussrichtung. Hier scheint die Kerbwirkung durch eine bessere Anbindung von Matrix und Faserbündel deutlich geringer, sodass der festigkeits- steigernde Einfluss der Glasfasern zum Tragen kommt. Auch hier entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen und bestätigen die vorigen Werte der Querkzugfestigkeit, des Single-Fibre Pull- Outs und der Makroschliffbilder. Ein weiterer Indikator ist der erhöhte Faseranteil im Zugprüf- körper, der für eine gesteigerte Performance im Verbund sorgt. Die E-Module liegen innerhalb des Streubereichs der Matrix und unterscheiden sich demnach nur marginal vom Referenz- wert. Die Proben mit Einleger PP-6x6 besitzen bei einer Beanspruchung in Kettrichtung nur eine leicht erhöhte Steifigkeit um ~1,2 % sowie eine Verringerung der Zugfestigkeit um ~2,6 %. In Schussrichtung liegen Festigkeit und Steifigkeit knapp unter den Werten der Referenz. Die Ab- weichungen können auf den geringen Faseranteil in den Zugproben und der damit zusammen- hängenden geringfügigen Verstärkungswirkung zurückgeführt werden. Allgemein bestätigen die Ergebnisse die These aus Kapitel 5.3, dass eine Ausrichtung der Einleger in Kettrichtung tenden- ziell bessere Verstärkungswirkung hat, als in Schussrichtung.

Die Bruchbilder in Abb. 92 bestätigen das angenommene Verhalten der Faser-Matrix Interakti- on. Es ist zu sehen, dass die Proben mit SBR-Verstärkung entlang eines querliegenden Rovings brechen. Ebenfalls ist eine Faserauslösung während des Zugvorgangs zu beobachten, die eine ungenügende Faser-Matrix Haftung widerspiegelt (vgl. Querkzugfestigkeit, Single-Fibre Pull- Out). Die Proben mit PP-infundierten Geweben brechen im Gegensatz zum SBR innerhalb eines Rovings. Dieses Bruchverhalten spiegelt die starke Faser-Matrix Interaktion entlang der

Grenzflächen wieder (vgl. Makroschliffbilder). Die in Zugrichtung liegenden Rovings bleiben nach dem Bruch intakt und halten die Bruchstücke zusammen.

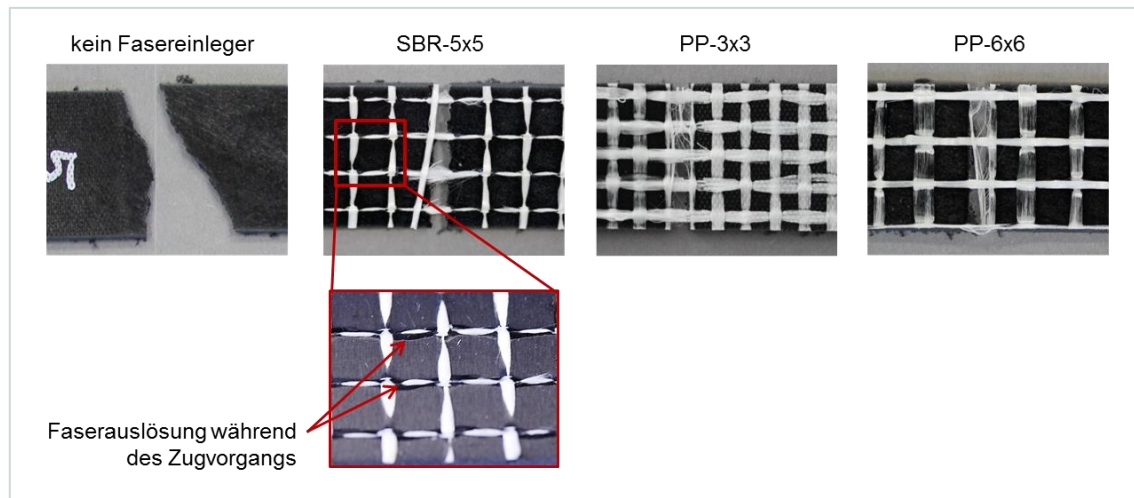


Abb. 92: Zugprüfung – Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Verbundproben

Biegeversuch

Die Biegeprüfung dient der Ermittlung der maximalen Streckspannung (Biegefestigkeit) sowie des Biegemoduls. Die Proben werden bei der Prüfung mit der unverstärkten Seite druckfinnen-seitig positioniert. Durch diese Anordnung werden die Gittergewebe jeweils auf Zug belastet. Abb. 93 zeigt die Prüfergebnisse der Biegeprüfung. Das Matrixmaterial zeigt eine maximale Streckspannung von 66 MPa und ein Biegemodul von 2454 MPa. Ein sehr ähnliches Verhalten zeigt die Variante mit Faserverstärkung SBR-5x5 bei Belastung des Schusses auf Zug. Hier sind lediglich marginale Abweichungen im Vergleich zu dem Matrixmaterial zu erkennen. Alle weiteren Einlegervarianten zeigen tendenziell eine Erhöhung der Kennwerte. Bei der Einlegervariante SBR-5x5 mit Belastung in Kettrichtung ist ein außergewöhnlich hoher E-Modul (3058 MPa) zu verzeichnen, was auf das Vorhandensein eines zweiten Kettfadensystems innerhalb der Dreherbindung zurückzuführen ist. Die Biegefestigkeit ist im Gegensatz dazu nur geringfügig erhöht (77 MPa). Die höchste maximale Streckspannung wird mit dem PP-3x3 Gewebe erreicht. Die Kennwerte des Matrixmaterials werden hierbei auf 103 MPa (Schuss) und 106 MPa (Kette) erhöht. Im Vergleich zu dem Gewebe mit SBR-Infusion ist dieses Verhalten auf den erhöhten Faseranteil im Probekörper sowie auf eine verbesserte Infusions-Matrix Haftung zurückzuführen, die u.a. auch anhand der Makroschliffbilder der Grenzfläche nachgewiesen wird. Gleiches spiegelt sich auch bei den Werten für die E-Module wieder, wobei die Kennwerterhöhung hier nicht so prägnant ist, wie bei der Biegefestigkeit. Die Proben mit PP-6x6 zeigen bei Belastung des Schussfadens eine Steigerung der Biegespannung auf 94 MPa und des Biegemoduls auf 2796 MPa. Auch in diesem Fall liegt eine gute Infusions-Matrix Interaktion vor, jedoch

ist der Faseranteil innerhalb des Probekörpers auf Grund der Gitterkonfiguration 6x6 mm deutlich geringer, als bei dem PP-3x3. Demnach sind auch die mechanischen Eigenschaften bei einer Zugbelastung der Kette leicht verringert.

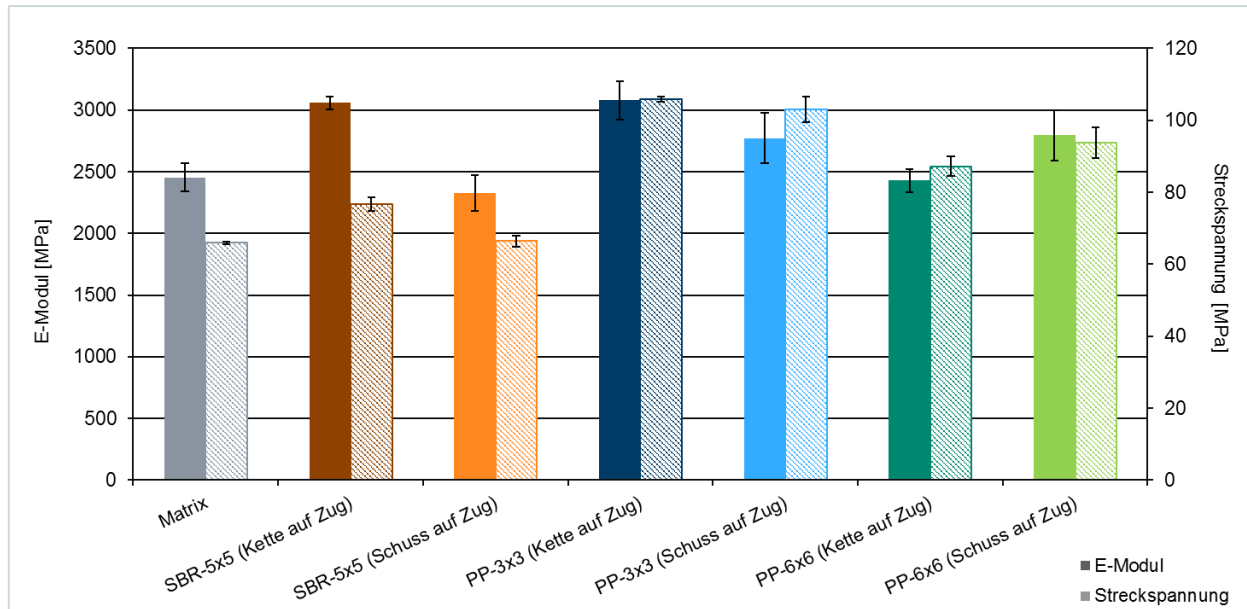


Abb. 93: Vergleich der Verstärkungswirkung unterschiedlich belasteter Gittergewebe im Biegeversuch

Die Abb. 94 zeigt das Bruchverhalten der Proben bei Biegebeanspruchung. Das Grundmaterial ohne Fasereinleger versagt durch einen Bruch in zwei oder mehrere Einzelteile. Die Proben mit Endlosfaserverstärkung verbleiben hingegen auch nach dem Bruch des Grundmaterials in einem zusammenhängenden Teil. Die Bruchebene der Proben verläuft dabei, wie bereits bei den Zugproben beobachtet, aufgrund der Kerbwirkung entlang eines Faserbündels.



Abb. 94: Biegeprüfung – Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Probekörper

Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von der Kurzfaserausrichtung

Im Vergleich der ermittelten E-Module untereinander fallen teilweise starke Streuungen der Werte auf. Diese Tatsache ist u.a. auf die unterschiedliche Ausrichtung der Kurzfasern zurückzuführen. Abb. 95 zeigt exemplarisch die Kurzfaserausrichtung in einer erstellten Musterplatte ohne Fasereinleger anhand eines Schlifffbildes. Dabei ist eine charakteristische Faserorientierung in Längs- und Querrichtung festzustellen. Wie GUPTA [97], JOHANNABER [98] und TRUCKENMÜL-

LER [99] beschreiben, richten sich die Fasern nahe der Werkzeugwand in Spritzrichtung aus (Scherzone), während die Fasern in Bauteilmitte eine Querorientierung zur Fließrichtung aufweisen (Kernzone).

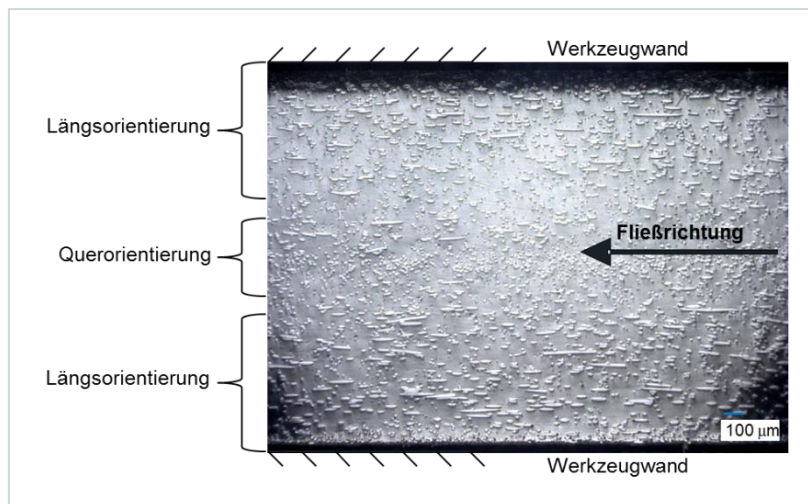


Abb. 95: Kurzfaserorientierung in den Musterplatten [36]

Aus der Kurzfaserorientierung resultiert dabei in Fließrichtung der Schmelze ein höherer E-Modul und eine höhere Festigkeit als quer zu dieser. Exemplarisch dafür ist in Abb. 96 der Spannungs-Dehnungsverlauf für das Gewebe PP-3x3 während der Biegeprüfung dargestellt. Die maximale Streckspannung erhöht sich durch die Orientierung längs zur Flussrichtung um etwa 53 %. Der Biege-E-Modul zeigt ebenfalls bei Belastung längs zur Flussrichtung eine Erhöhung von 3008 MPa auf 6280 MPa um etwa 109 %. Demnach ist eine korrekte Ausrichtung der Einleger innerhalb der Kavität in Zusammenhang mit der Wahl des Angusses für eine optimale Ausnutzung der Materialeigenschaften unabdingbar. Die Ergebnisse für die Richtungsabhängigkeit des E-Moduls spiegeln sich ebenfalls in Untersuchungen von AURICH [101] wieder.

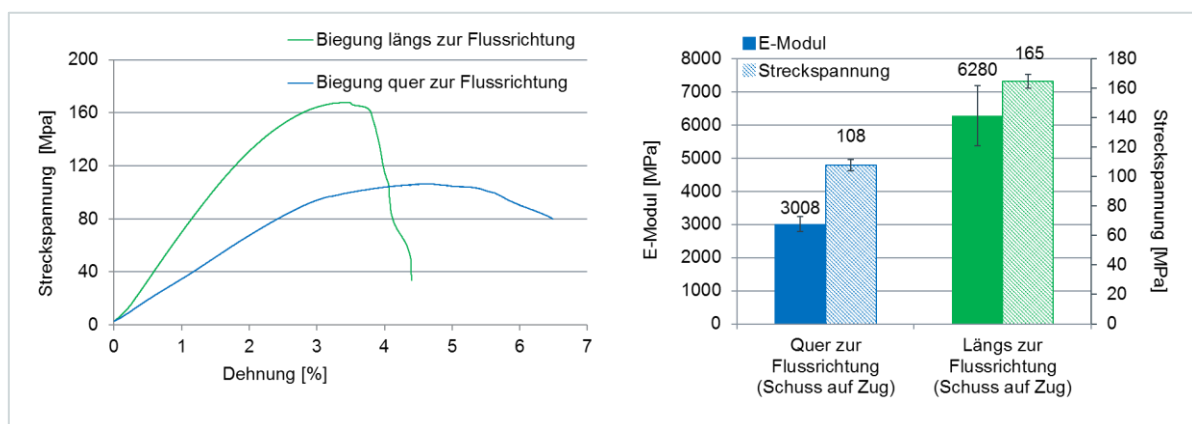


Abb. 96: Biegeversuch – exemplarischer Spannungs-Dehnungs-Verlauf (links) und Streckspannung und E-Modul (rechts) [36]

5.4.3 Dynamische Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften

Das Verhalten bei dynamischer Beanspruchung wird über die Schlagzähigkeit sowie das Durchstoßverhalten der Platten bestimmt. Die entsprechenden Erkenntnisse sollen Rückschlüsse auf das Verhalten gitterverstärkter Bauteile unter dynamischer Crashbelastung zulassen.

Schlagzähigkeit

Das Zähigkeitsverhalten der endlosfaserverstärkten Spritzgussplatten bei schlagartiger Belastung ist in Abb. 97 zu sehen. Dabei sind die Schlagzähigkeit und die Energieaufnahme der Proben in Abhängigkeit des verwendeten Fasereinlegers aufgetragen. Das PP-GF30 als Matrixmaterial weist eine Schlagzähigkeit von 59 kJ/m² bei einer Energieaufnahme von 2,0 J auf. Die Proben mit SBR-5x5 zeigen erwartungsgemäß eine Verringerung der Schlagzähigkeit in Schussrichtung auf 54 kJ/m² und der Energieaufnahme auf 1,87 J. Bei Belastung in Kettrichtung ergibt sich eine Erhöhung der Schlagzähigkeit auf 64 kJ/m² und der Energieaufnahme auf 2,20 J. Es ist zu erkennen, dass auch unter dynamischer Belastung die Verstärkung in Kettrichtung die bessere Performance bietet. Die gleiche Abhängigkeit zeigt sich bei den Fasereinlegern mit PP-Infusion. Es ist generell eine durchgehende Erhöhung von Schlagzähigkeit und Energieaufnahme gegenüber dem Matrixmaterial zu verzeichnen, wobei ebenfalls die höheren Messwerte in Kettrichtung auftreten. Der PP-3x3 Einleger zeigt die höchsten Kennwerte mit einer Erhöhung der Schlagzähigkeit von ~42 % auf 84 kJ/m² und einer Erhöhung der Energieaufnahme um ~43 % auf 2,9 J. Das PP-6x6 zeigt ähnliche, wenn auch im Vergleich zu PP-3x3 geringere Steigerungen der Kennwerte auf 78 kJ/m² bzw. 2,71 J in Kettrichtung. Diese Ergebnisse spiegeln die gute Faser-Matrix Interaktion zwischen PP-Infusion und Spritzgussmatrix wieder und unterstreichen die vorherigen Ergebnisse der statischen Untersuchungen sowie die der Querkzugfestigkeit und des Single-Fibre Pull-Outs. Allgemein ist eine hohe Streuung der Kennwerte für Schlagzähigkeit und Energieaufnahme festzuhalten. Diese Streuung ist auf die unterschiedlichen Aufschlagpunkte des Pendels auf den Proben zurückzuführen. Es kann durch den genormten Versuchsaufbau nicht sichergestellt werden, dass das Pendel bei jeder Prüfung in Höhe eines Rovings im Gewebe auftrifft.

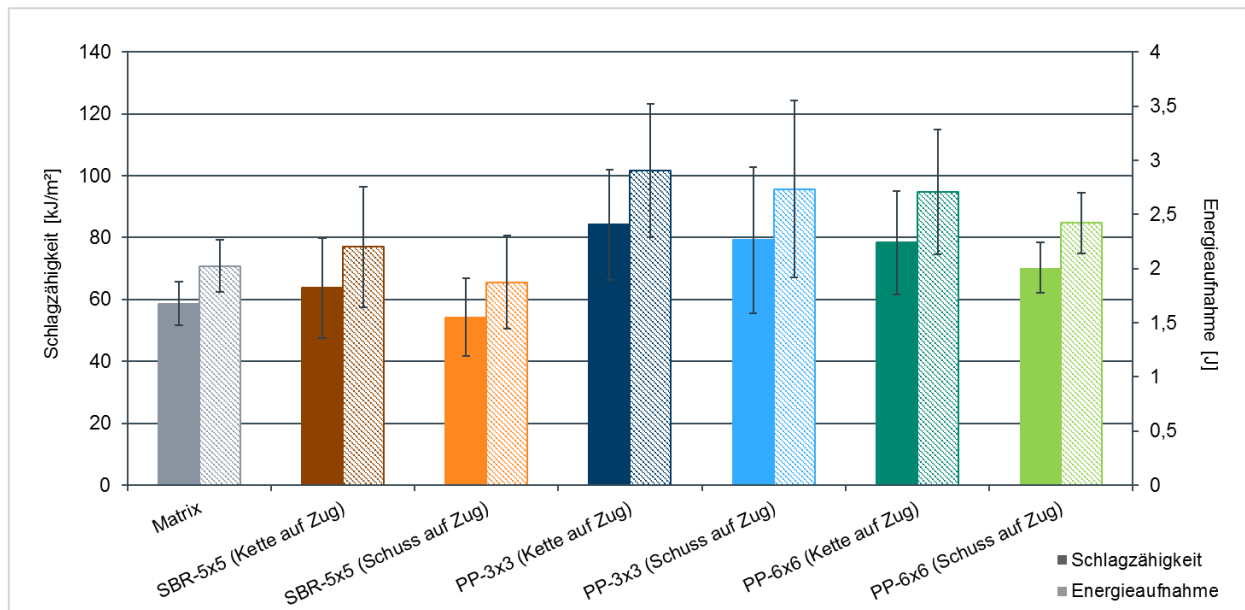


Abb. 97: Schlagzähigkeit – Verstärkungswirkung der Fasereinleger auf schlagartige Belastung [47]

Die Bruchbilder der Prüfung zeigen eine Durchbiegung der Proben entgegengesetzt der Belastungsrichtung (vgl. Abb. 98). Die vorliegende Biegung ist auf eine Rückfederung der Probe nach dem Bruch zurückzuführen. Durch die materialabhängige Schwindung des Polypropylen entstehen bei der Abkühlung Zugspannungen im Verstärkungsgewebe (die Fasern liegen gestreckt vor). Das bedeutete, dass das PP auf der Seite mit Gewebeverstärkung weniger stark schwinden kann, als auf der Seite ohne Verstärkung. Die Schlagbelastung des Pendels führt zum Bruch der Kunststoffmatrix, während das Gittergewebe intakt bleibt. Die Glasfasern des Verstärkungsgewebes entspannen sich und bauen die Spannungen im Zuge einer Verformung zur unbelasteten Seite ab. Infolgedessen verformt sich der Verbund. Ebenfalls ist auch bei der Schlagzähigkeitsmessung ein Zusammenhalt der gebrochenen Probe durch den Fasereinleger gegeben.

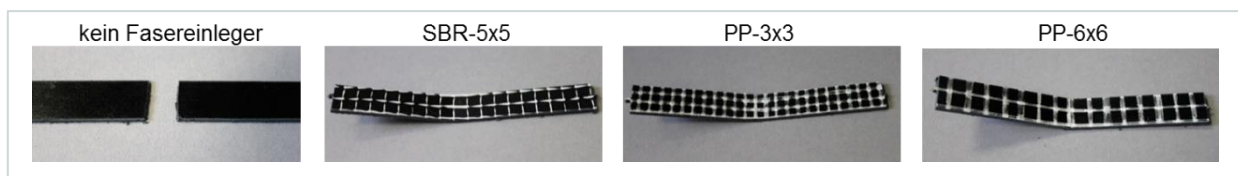


Abb. 98: Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Probekörper nach Schlagzähigkeitsprüfung [47]

Durchstoßversuch

Die Durchstoßprüfung geschieht mittels einer rotationssymmetrischen Kugelspitze. Somit wird nicht nach Kett- und Schussfaden, sondern nach Belastung auf Zug (Faserverstärkung dem Durchstoßkörper abgewandt) oder Druck (Faserverstärkung dem Durchstoßkörper zugewandt) unterschieden. Abb. 99 zeigt das Versagensverhalten anhand des Kraft-Weg Verlaufs am Bei-

spiel einer repräsentativen Kurve für Matrix und verstärkter Platte mit PP-3x3 Gittergewebe. Es sind zwei unterschiedliche Versagensverhalten zu erkennen. Der Kurvenverlauf für die Matrix zeigt einen Anstieg der Kraft auf ein Maximum (b) von 1397 N bei 6,11 mm Weglänge. Der Probekörper versagt unmittelbar und die Kraft sinkt nach wenigen weiteren Ausschlägen auf ein Niveau knapp über Null. Ein anderes Verhalten zeigt der verstärkte Probekörper mit PP-3x3 auf der Oberseite. Es sind zwei Kraftniveaus ($a_{1,2}$) zu erkennen. Das Maximalniveau tritt bei 1681 N und 4,80 mm Weg auf. Die verstärkte Platte erreicht nach einem kürzeren Weg das Maximum und überschreitet den Peak der Matrix um 284 N. Peak a_1 kennzeichnet das Matrixversagen. Nach Abfall des Kraftniveaus um etwa die Hälfte wird ein zweiter Peak (a_2) erreicht, der über einen Weg von ca. 4 mm um eine Kraft von ~780 N schwankt. In diesem Bereich versagt die Faserverstärkung.

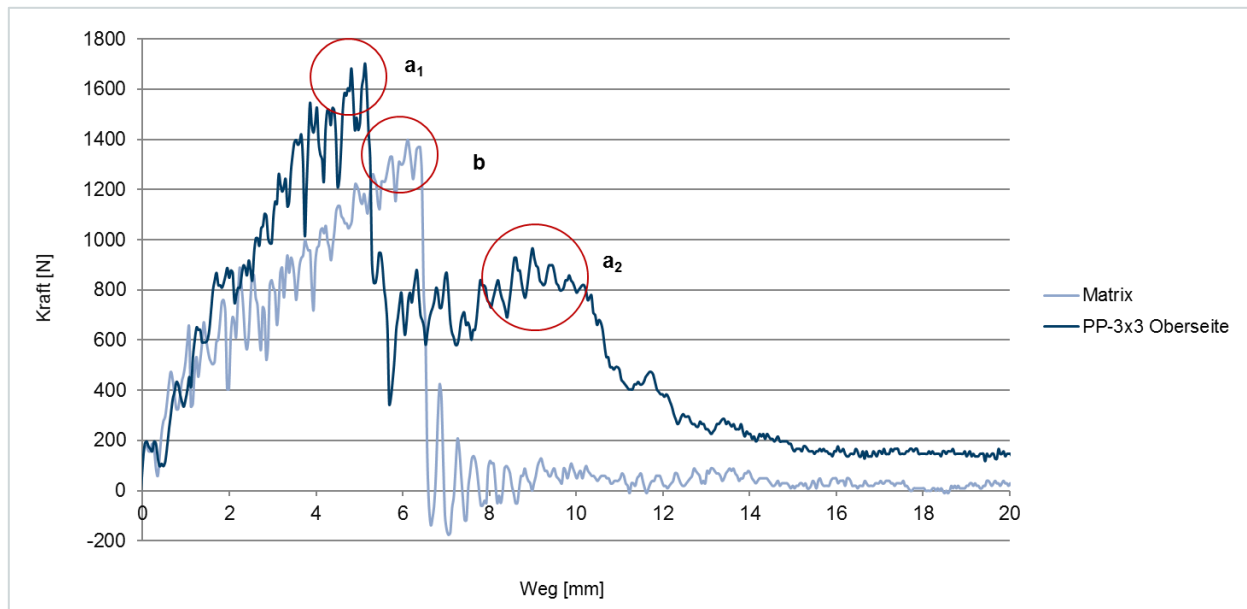


Abb. 99: Durchstoßversuch – Kraft-Weg Verlauf für Platten aus reiner Matrix und mit PP-3x3 Verstärkung

Die durchschnittliche maximale Durchstoßkraft der Proben mit unterschiedlichen Endlosfaserverstärkungen sind in Tab. 30 aufgeführt. Das Rohmaterial ohne Fasereinleger zeigt eine maximale Durchstoßkraft von 1319 N. An den Proben mit Fasereinleger ist durchgehend eine Erhöhung der aufzubringenden Kraft gegenüber dem Rohmaterial festzustellen. Es ist zu erkennen, dass die Durchstoßkraft in Abhängigkeit zu der Beschichtung sowie zum Faseranteil innerhalb des Probekörpers steht. Die geringste Kennwerterhöhung ist mit dem SBR-5x5 Einleger bei einer Druckbelastung der Fasern mit nur ~4 % Steigerung zu verzeichnen. Auf der Probenunterseite erreicht das SBR-5x5 eine Steigerung um ~14 %. Die Festigkeitssteigerung am PP-3x3 mit Einleger auf der Oberseite beträgt ~25 %. Die PP-3x3 Verstärkung auf der Unterseite zeigt mit

~43 % Erhöhung den größten Verstärkungseffekt. Das PP-6x6 steigert die Durchstoßeigenschaften lediglich um ~17-19 %. Die Kennwerterhöhungen durch die Gewebe mit PP-Infusion untermauern die zuvor ermittelten Ergebnisse und unterstreichen die gute Faser-Matrix Interaktion zwischen PP-Infusion und SG-Matrix. Die Ergebnisse zeigen allgemein eine erhöhte Streuung der Werte. Eine mögliche Ursache dafür ist die variierende Lage von Faserbündeln orthogonal zur Kegelspitze des Durchstoßkörpers. So ist es bspw. möglich, dass die Kegelspitze bei einigen Durchstoßkörpern direkt auf einen Bindungspunkt im Gewebe trifft.

Tab. 30: Maximale Durchstoßkraft im Durchstoßversuch

Material		Maximale Durchstoßkraft [N]
Matrix		1319 ± 113
SBR-5x5	Oberseite	1376 ± 106
	Unterseite	1509 ± 141
PP-3x3	Oberseite	1655 ± 118
	Unterseite	1893 ± 80
PP-6x6	Oberseite	1568 ± 127
	Unterseite	1548 ± 65

In Abb. 100 sind exemplarisch die Versagensbilder der Proben nach Durchstoß abgebildet. Allgemein ist zu erkennen, dass die Einleger in den Proben die Bruchstücke nach dem Durchstoß zusammenhalten. Somit wird ein Splitterflug verhindert, was sich positiv auf das Versagensverhalten des Zielbauteils im Crashfall auswirkt. Die Glasfasern der Gittereinleger lösen sich um die Bruchfläche herum und werden zum Teil aus dem Verbund gezogen. Diese Auszugsarbeit nimmt zusätzliche Durchstoßenergie im Verbund auf und erhöht somit die Performance unter dynamischer Belastung.



Abb. 100: Durchstoßversuch – Bruchbilder unterschiedlich verstärkter Probekörper

5.4.4 Beurteilung der Eigenschaftsbestimmungen

Es ist festzuhalten, dass der Verbund mit PP-3x3 Verstärkung in Kettrichtung über die besten Eigenschaften verfügt. Dies gilt sowohl unter statischer, als auch unter dynamischer Belastung. Die Eigenschaftsuntersuchungen der Musterplatten haben gezeigt, dass der Glasfaseranteil des Verbunds durch die Gittereinleger um ca. 3,5 % (PP-6x6) bis 6,0 % (PP-3x3) gesteigert wird. Bezogen auf die geringfügige Steigerung des Fasergehalts sind die Performancesteigerungen im Bereich der Biege, Schlag- und Durchstoßbelastungen durch die PP-infundierten Gewebe beachtlich. Dies kann durch die Bildung eines Phasenübergangs und somit einer optimalen Haftung zwischen PP-Infusion und SG-Matrix erklärt werden. Demzufolge übersteigen die statischen und dynamischen Kennwerte des PP-6x6, trotz geringerem Faseranteil, größtenteils die Kennwerte des SBR-5x5. Die Zugeigenschaften hingegen werden durch die PP-infundierten Gewebe nur geringfügig verbessert. Für eine Eigenschaftssteigerung in diesem Bereich, ist ein höherer Faseranteil in der Verstärkung notwendig. Die größten Eigenschaftssteigerungen sind bei den dynamischen Untersuchungen, insbesondere beim Durchstoßversuch (bis zu 51 %) festzustellen. Neben der Kraftaufnahme der Glasfasern im Gittergewebe führt das Auslösen der Fasern und die damit zusammenhängende Energieaufnahme zu den erreichten Kennwerten. Dabei sind sowohl die gesteigerten Eigenschaften sowie die Vermeidung von Splitterflug für den Einsatz im Crashfall förderlich.

Die SBR-5x5 Verstärkung weist nur geringfügige Eigenschaftsverbesserungen im Vergleich zum reinen Matrixmaterial auf. Trotz erweitertem Kettfadensystem ist die Verstärkungswirkung auf Grund der geringen Faser-Matrix Interaktion ungenügend. Dies wird sowohl durch die Mak-

roschliffbilder der Grenzfläche als auch durch ein Auslösen der Fasern entlang der Oberfläche während des Zugversuchs bestätigt. Im Weiteren zeigt sich auch anhand der Bruchbilder des Biege- und Zugversuchs das unzureichende Verbundverhalten.

Für die Umsetzung der Gittergewebe im Kunststoffmontageträger ist das Gittergewebe PP-3x3 zu bevorzugen. Vor dem Hintergrund der systematischen Vorgehensweise und trotz der unterschiedlichen Performance im Verbund, werden alle drei Gittergewebe weiter betrachtet. Grund hierfür ist, dass das SBR-5x5 bereits kommerziell verfügbar und in reproduzierbarer, qualitativ gleichbleibender Form vorliegt. Somit stellt das SBR-5x5 eine Variante dar, bei der Fehlergrößen, wie z.B. technische Webfehler ausgeschlossen werden können. Den Vergleichsstandard bildet der aktuell in Serie verbaute Kunststoffmontageträger mit Metalleinleger.

5.5 Umsetzung der Gittergewebe in das Bauteil KUM

In dem Schema aus Abb. 101 wird nun der Strang der Bauteilentwicklung hervorgehoben. In diesem Entwicklungsschritt fließen die vorherigen Ergebnisse aus Verarbeitung, Handling und Drapierung der Gittergewebe mit ein. Daraus resultierend lassen sich allgemeine Richtlinien für die Auslegung und Herstellung gittergewebeverstärkter Bauteile ableiten.

Erarbeitung des Substitutionspotentials

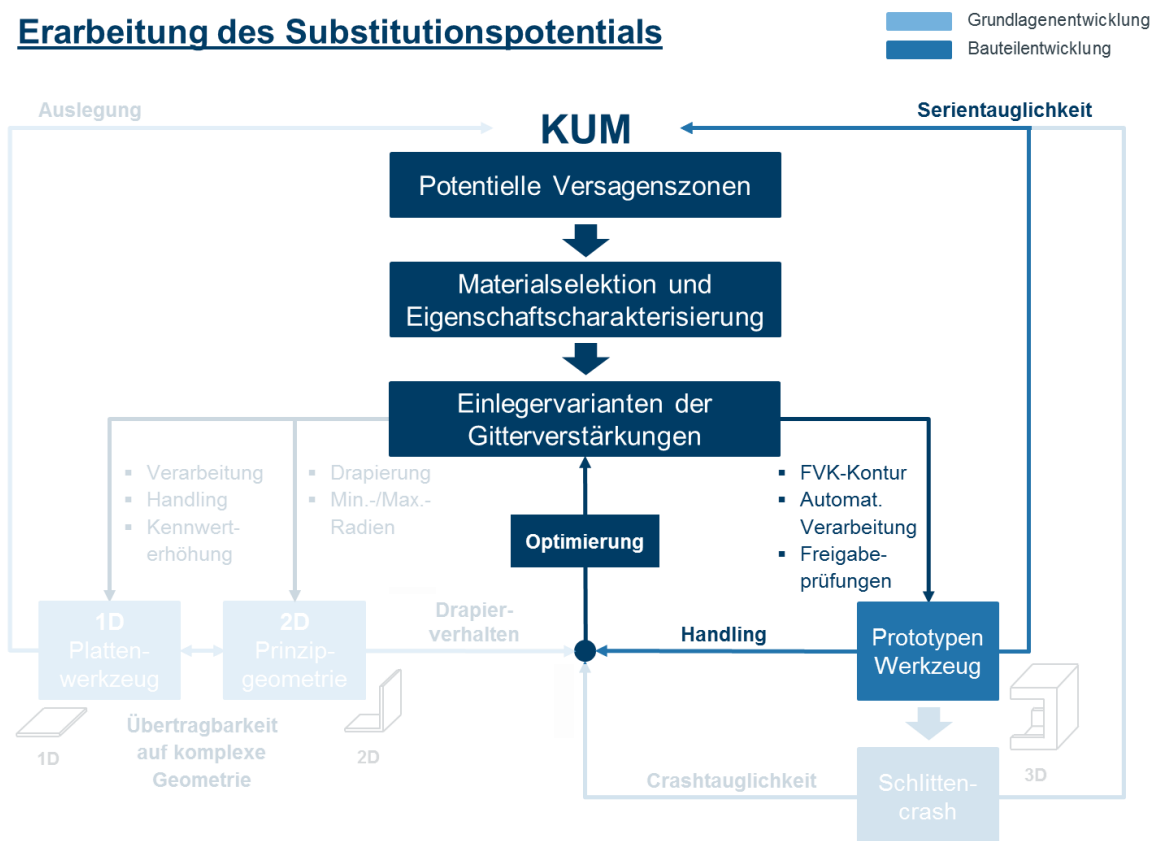


Abb. 101: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Änderung des Einlegebereichs in FVK-Kontur und Fertigung von gittergewebeverstärkten KUM für Freigabeprüfungen

Das nachfolgende Kapitel stellt konstruktive Richtlinien für die Auslegung von Faserverbundbauteilen mit Gittergeweben auf und beschreibt die konstruktive Werkzeugänderung am Beispielbauteil KUM. Weiterhin werden die theoretische Betrachtung der Formteillfüllung über Moldflow und die Auswirkung der Spritzparameteränderungen mittels Kreuzversuchsplan untersucht. Die Werkzeugänderung ergibt sich aus den Ergebnissen der Kapitel 5.2 – 5.4 und soll in dem seriennahen Werkzeug eine faserverbundgerechte Verarbeitung der Gittergewebe im Spritzgussprozess sicherstellen.

5.5.1 Erarbeitete allgemeine Konstruktionsrichtlinien

Aus den voran gegangenen Handlings- und Versuchsversuchen lassen sich allgemeine Konstruktionsrichtlinien zur Erstellung von FVK-Bauteilen mit Gittergeweben ableiten. Diese sind in Tab. 31 tabellarisch zusammengefasst und in die Kategorien *Werkzeug* und *Einleger* gegliedert.

➤ Werkzeug

Allgemein kann festgehalten werden, dass der Einlegebereich im Bauteil sowie das Gittergewebe selbst durchgängig und flächig ohne Versprünge gestaltet werden muss. Die Bauteilwandstärke ist abhängig von den Lagen der Verstärkung und sollte zwischen 2,5 – 3,5 mm ausgeführt werden. Bei größeren Wandstärken kann es vorkommen, dass der Gittereinleger zu viel Spiel besitzt und dementsprechend während des Einspritzvorgangs zusammengeschoben wird. Der Angusstyp ist bei fasergefüllten Matrices als Filmanguss zu wählen, damit eine Ausrichtung der Fasern innerhalb der Spritzgussmasse erfolgt und deren Potential zusätzlich genutzt werden kann. Die Positionierung der Gittergewebe im Spritzgusswerkzeug kann über einen gefederten Stift erfolgen, der beim Schließen des Werkzeugs zurückgedrückt wird. Für eine Einbettung in die neutrale Bauteilebene ist eine Klemmung des Einlegers notwendig. Je nach Faserart und Menge kann es hier jedoch zu Abrasion im Werkzeug kommen. Wird ein konturierter Bereich mit Gittergeweben verstärkt, ist eine Vorpositionierung über Hydraulikschieber möglich, ohne dass der Einleger von der Schiebermimik während des Schließvorgangs geklemmt oder beschädigt wird. Dabei sollten die Konturen im Einlegebereich Radien >14 mm besitzen.

➤ Einleger

Der Einleger sollte flächig und möglichst durchgängig ausgeführt werden. Der Gitterabstand bzw. die Gitterlochbreite variiert je nach Anwendungsfall (gewünschter Endlosfasergehalt) und eingesetzter Spritzgussmatrix. Es muss darauf geachtet werden, dass die Fasern einer verstärkten Spritzgussmatrix durch das Gittergewebe hindurchpassen, um Staueffekte zu vermeiden. Je nach Bauteilgeometrie kann auf unterschiedliche Webarten zurückgegriffen werden. Bspw. sollte für ein konturiertes Bauteil eine verschiebefeste Dreherbindung zum Einsatz kommen. Je nach

Webart ist das Einbringen von Hauptlastbereichen (zusätzliche Rovings, verkürzter Gitterabstand) möglich. Weiterhin können verschiedene Faserarten in bestimmten Bereichen gezielt die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. In Abhängigkeit der Gesamtbelastung kann ebenfalls die Basisfaser divergieren. Bspw. ist eine Carbonfaser bei Zugbelastung von Vorteil. Darauf aufbauend ist die Lage des Einlegers im Bauteil zu überprüfen und mit dem Werkzeugkonzept abzustimmen.

Tab. 31: Allgemeine Konstruktionsrichtlinien zur Erstellung von FVK-Bauteilen mit Gittergeweben

Kategorie Werkzeug	Konstruktionshinweis
Bauteilwandstärke	Min. 2,5 mm (einlagige Verstärkung) Max. 3,5 mm (doppellagige Verstärkung)
Angussart	Filmanguss (bei fasergefüllter Spritzgussmatrix)
Werkzeugfunktionen	In Abhängigkeit der Bauteilgeometrie Hydraulikschieber im Einlegerbereich vorsehen
Positionierung	Gefederter Stift <u>oder</u> Klemmung des Einlegers für Einbettung in neutrale Ebene
Einlegerbereich	Kontur des Einlegebereichs durchgängig gestalten, Radien Werkzeug >14 mm
Kategorie Einleger	Konstruktionshinweis
Gitterabstand/Gitterlochbreite d	In Abhängigkeit der Länge der Füllfaser in der Matrix nach folgender Formel zu berechnen: $d = x * l_F * y * \frac{1}{l_F}$ d Gitterlochabstand/Gitterlochbreite l_F Länge Füllfaser
Webart	In Abhängigkeit der Bauteilgeometrie, z. Bsp. verschiebefeste Dreherbindung für konturreiche Geometrie
Einlegergeometrie	Flächig/durchgängig für optimale Kraftübertragung, Einbringen von Hauptlastbereichen möglich
Positionierung im Bauteil	In Abhängigkeit der auftretenden Lastart Zug → neutrale Ebene Biege → Bauteilunterseite (auf Zug belastete Seite) Schlag/Durchstoß → Bauteilunterseite (auf Zug belastete Seite)
Faserart	In Abhängigkeit der auftretenden Lastart und des Matrixsystems (siehe Abb. 66) Zug → Carbonfaser oder Glasfaser Biege → Carbonfaser oder Glasfaser Schlag → Glasfaser Druckscherung → Jute <u>oder</u> Carbonfaser

Als potenzielle Bauteile, in die eine Gitterverstärkung integriert werden kann, sind grundsätzlich flächige und wenig konturierte Bauteile zu nennen. In Bezug auf das Automobil sind das bspw. die Sitzschale, die Unterbodengruppe, das Türtablett oder die Durchreiche der Rücksitzbank. Für jedes Bauteil müssen die Grenzlastfälle betrachtet und die Faserart sowie der Aufbau des Gitters

individuell ermittelt werden. Zusätzlich sind gesonderte Forderungen wie zum Beispiel bei der Bodengruppe die Beständigkeit gegen Steinschlag, Feuchtigkeit und Streusalz zu beachten.

5.5.2 Faserverbundgerechte Bauteil- und Werkzeugänderung

Wie in Kapitel 4.2.5 beschrieben, besteht das Spritzgusswerkzeug aus vier Einzelteilen und besitzt die Kontur der aktuellen KUM *Tiguan*-Serie. Um eine verbesserte Einlegezone für das Gittergewebe im KUM zu schaffen, wird die Geometrie des Wechseleinsatzes auf der Fahrerseite faserverbundgerecht umkonstruiert. Die Umkonstruktion ist notwendig, um eine reproduzierbare Verarbeitung ohne Faserschädigung im Einleger zu gewährleisten. Ebenfalls ist eine vereinfachte Geometrie verschnittarm und kann problemlos im Verarbeitungsprozess automatisiert werden. Rahmenbedingungen liefern die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.2 – 5.4. Die thermische Analyse definiert die Verarbeitungsbereiche der Beschlichtungen/Infusionen und der Spritzgussmatrix, bevor ein Materialabbau eintritt. Rückführend hierauf kann beurteilt werden, wie die Verarbeitung, insbesondere die Temperierung von Werkzeug und Spritzgussmasse erfolgen muss, um eine Faser-Matrix Interaktion zwischen Matrix und Einleger zu erzielen. Die Interaktion wird durch Faserbündelauszugsversuche und Schlifffbilder entlang der Grenzflächen bestätigt. Die Ergebnisse der Drapierfähigkeit zeigen den Zeitpunkt der Faltenbildung innerhalb des Gewebes an. Ebenfalls zeigt sich anhand der Verformung am lasergesinterten Modell, bei welchem Drapierradius sich die ursprüngliche Konfiguration des Gewebes verändert und somit die Imprägnierung mit Spritzgussmatrix beeinträchtigt. Die Musterungsversuche anhand der Platten zeigen den Einfluss von Gewebedopplung und unterschiedlicher Ausrichtung der Einleger innerhalb der Kavität auf die Verarbeitung im SG-Prozess. Zudem werden Verarbeitungsdefizite bei der Wahl verschiedener Angusstypen aufgedeckt.

Für eine faserverbundgerechte Bauteilkontur muss in dem besagten Anwendungsfall KUM *Tiguan* der Bereich in Höhe der Metalleinleger geglättet werden. Die Untersuchungen zur Drapierfähigkeit zeigen, dass die Radien vergrößert und ein Kontursprung durch eine durchgehend aufgespannte Fläche ersetzt werden muss, um eine möglichst homogene Einlegefläche zu generieren. Gleichzeitig bedingt die vorgegebene Wandstärke im Einlegebereich, dass keine Dopplung der Gewebelagen möglich ist. Abb. 102 zeigt das KUM-Bauteil in aktueller Seriengeometrie (links) und der abkonstruierten FVK-Geometrie (rechts) in der Front-, Seiten- und Rückansicht. Die rot gekennzeichneten Bereiche definieren die kritischen Konturen, die für eine faserverbundgerechte Geometrie geändert werden müssen. Alle Änderungen werden unter Berücksichtigung des aktuellen Bauraums vorgenommen, was bedeutet, dass der FVK-KUM in dem Motorraum der aktuellen Serie verbaubar ist. In der Frontansicht ist ein Versprung mit kleinem Radius

zu erkennen. Dieser wird in der FVK-Geometrie geglättet. Die Seite oberhalb des Radius wird seitlich vorgezogen, um einen sanften Konturverlauf zu formen. Bei der Seitenansicht ist zu sehen, dass der Befestigungsniel für das Verstärkungsblech entfällt. Ebenso wird die schmaler werdende Kontur unterhalb des Niets aufgeweitet sowie der stützende Winkel unterhalb der Scheinwerferaufnahme verkürzt. Die Rückseite zeigt den Anschraubpunkt für den Crashsensor am Metallblech. Anstelle dessen wird ein Dom mit Blindniel und Positionierhilfe konstruiert. Die Konstruktion ist entformungsgerecht und ermöglicht eine angemessene Werkzeugkühlung. Die Rippen aus dem Obergurt werden bis in den Seitengurt durchgezogen, um zusätzliche Stabilität zu liefern. Die dargestellten Radien der Seitenkontur werden in Anbetracht der Drapiererergebnisse am lasergesinterten Modell vergrößert. Der Radius am Anschraubpunkt der Trägerteile (erstgenannter Radius von 4,5 mm) bleibt erhalten, da der Bereich einerseits außerhalb der Aufprallzone der Crashbarriere liegt und andererseits auf Grund der Verschraubung zum Scheinwerfer als fester, unveränderlicher Punkt im Bauteil gesetzt ist.

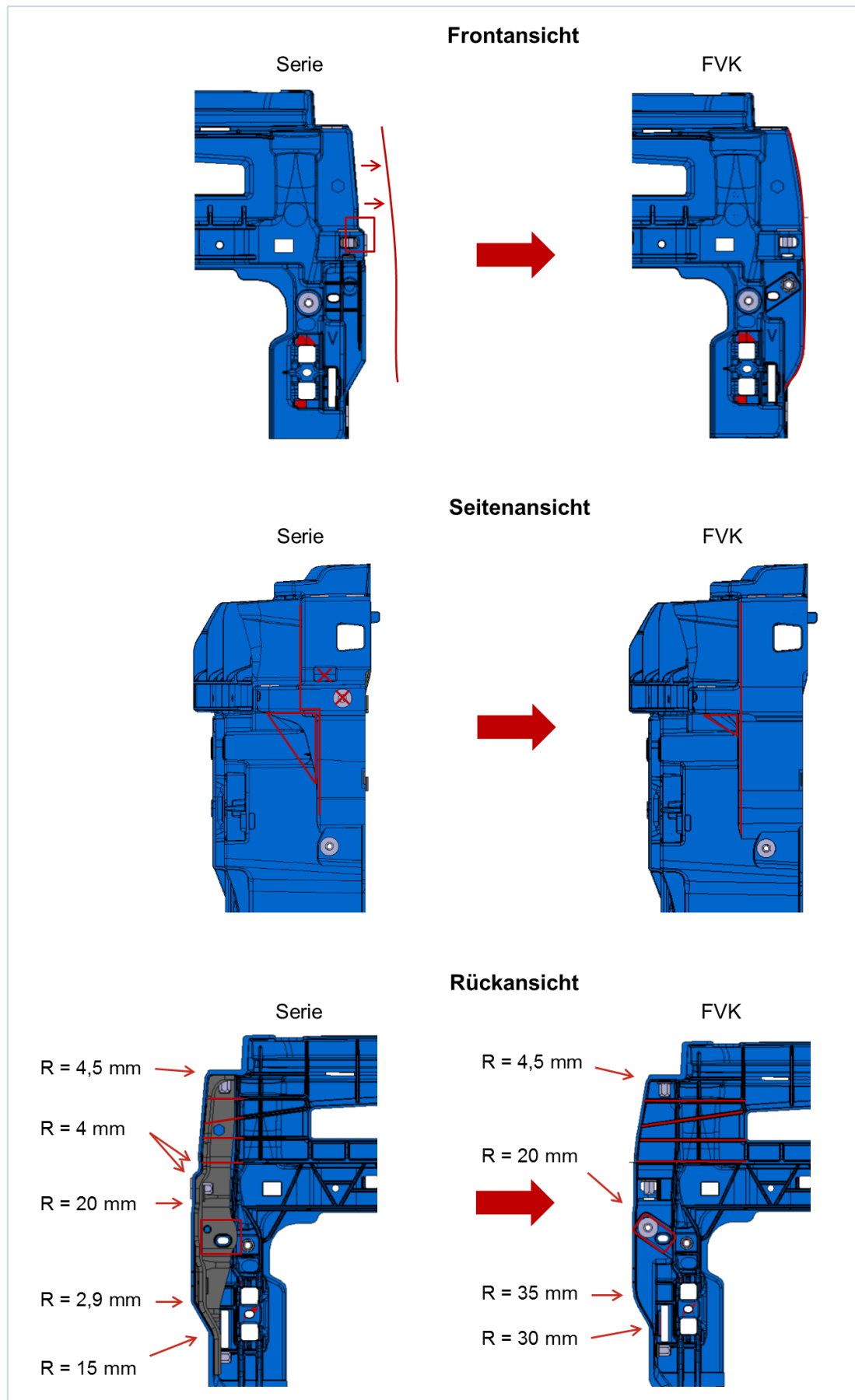


Abb. 102: Bauteiländerungen – Gegenüberstellung von Serie und FVK in drei Ansichten [59]

5.5.3 Betrachtung der Formteilstückfüllung über Moldflow

Abb. 103 zeigt einen Teil der Moldflow-Analyse mit den angenommenen Parametern für die Berechnung sowie die ermittelten Öffnungs- und Schließzeiten der Düsen. Die Zielstellungen für die Berechnung lauten wie folgt:

- Vorkommen ausgeprägter Bindenähte nur im mittleren seitlichen Bereich
- Untersuchung des Obergurts hinsichtlich Lufteinschlüssen
- Minimierung des Verzugs.

Die Anspritzung wird als Kaskadensteuerung über sechs Düsen realisiert. Durch die Kaskadensteuerung im Spritzgussprozess kann die bauteilschwächende Bindenaht in den gewünschten Bereich verschoben werden. In Abb. 103 ist zu sehen, dass die Schmelzefront um die Düse 1 zunächst radial verläuft und sich im Anschluss mit der Schmelzefront von Düse 2 (Mitte Obergurt) verbindet. Die Fließfronten selbst verlaufen über den Wandquerschnitt im Serienwerkzeug in einer breiten Front. Dies lässt eine ähnliche Kurzfaserausrichtung wie bei den Musterplatten mit Filmanguss erwarten.

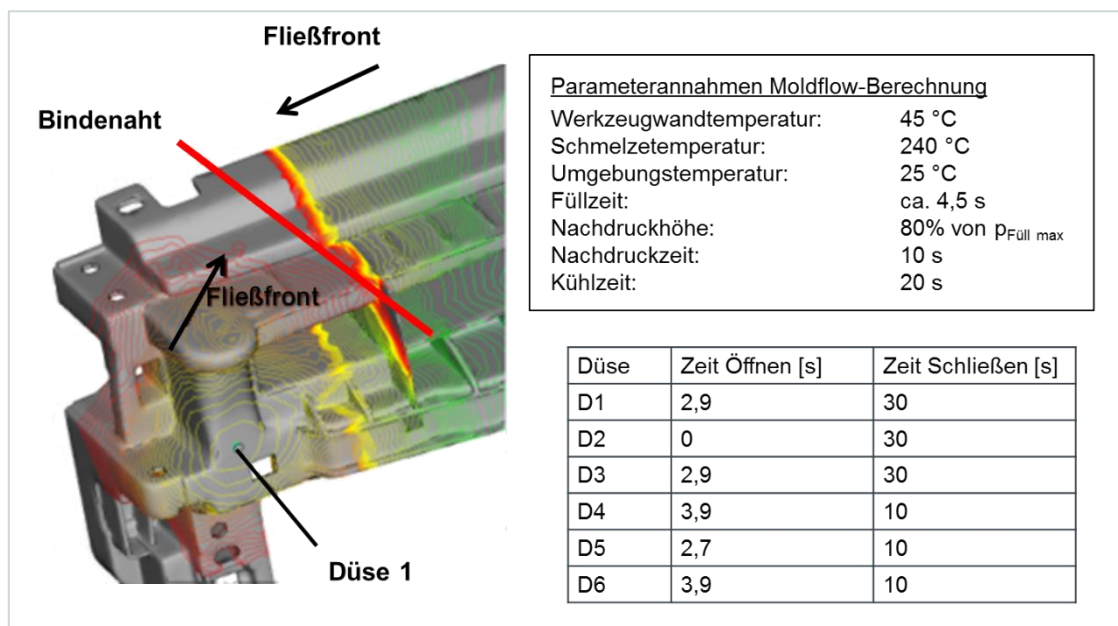


Abb. 103: Moldflow – Fließfrontverlauf im Bereich des Seiten-/Obergurts mit Anspritzpunkt Düse 1 [59]

Die berechneten Öffnungs- und Schließzeiten der Düsen sind ebenfalls in Abb. 103 dargestellt. Der maximal auftretende Druck innerhalb des Werkzeugs liegt dabei bei ca. 330 bar. In Abb. 104 ist zu erkennen, dass ein vorzeitiges Schließen der unteren Düsen D4, D5, D6 sinnvoll ist, um in dem linken und rechten Seitengurt einen simultanen Füllverlauf zu erreichen (linker Abbildungsbereich). Ebenfalls ist zu sehen, dass mit den festgelegten Düsenöffnungs- und Schließ-

zeiten ein harmonischer Druckverlauf am Umschaltpunkt sowie ein maximaler Verzug von 5,29 mm (rot) in den Eckbereichen des KUM entstehen. Um den schwindungsbedingten Verzug zu begrenzen, wird eine Bombierung des Werkzeugs vorgenommen. Das bedeutet, dass die Kavität entsprechend des simulierten Verzugs bspw. im Übermaß ausgelegt wird.

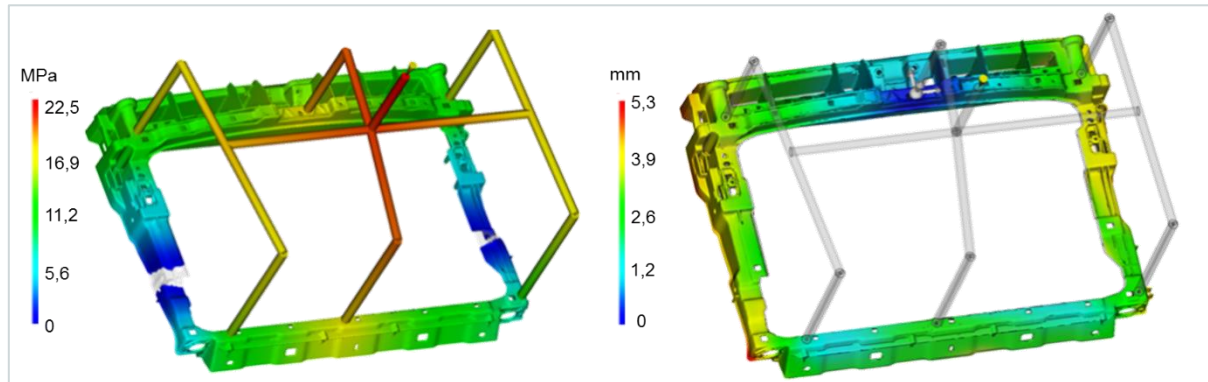


Abb. 104: Moldflow – Druckverlauf am Umschaltpunkt (links) und Verzug (rechts) [59]

5.5.4 Herstellungsprozess der FVK-KUM

Die Herstellung der FVK-KUM wird über den Spritzgussprozess realisiert. Die Bestückung des Werkzeugs mit Inserts und den Gewebereinlegern erfolgt manuell. Für die Positionierung der Einleger wird in der ersten Versuchsreihe Klebeband, in den weiteren Versuchsreihen ein gefederter Stift in einem der Schieber verwendet. Ein vorgeschalteter Preformprozess des Gewebereinlegers dient der konturgenauen Anpassung im Werkzeug (Abb. 105). Zusätzlich werden die seitlichen Schieber manuell gefahren, um ein Einklemmen oder Verschieben der Fasern während des Schließvorgangs zu verhindern (vgl. Abb. 106). Ein geeignetes Lösungskonzept für die Serie stellt der Einsatz eines Hydraulikschiebers dar, der unabhängig von der Schließbewegung des Werkzeugs gesteuert wird. In diesem Fall kann der ungeformte Gewebezuschnitt auf einen gefedernden Stift am formgebenden Hydraulikschieber positioniert werden. Der Hydraulikschieber fährt in einem vorgelagerten Schritt zu und bringt den Einleger in Kontur, sodass darauf ein schnelles Zufahren des gesamten Werkzeugs inklusive zügigen Einspritzvorgangs möglich ist. Demnach ist der Einsatz eines Hydraulikschiebers für einen automatisierten Prozess und die Applikation in der Serie erforderlich.

➤ Zuschnitt und Preforming

Abb. 105 zeigt schematisch den Zuschnitt- und Preformprozess der Gewebereinleger. Für die Erstellung der Einleger werden im ersten Schritt (1, 2) grobe Zuschnitte der Gittergewebe aus der Rollenware getätigt. Dabei wird die Zuschnittsgeometrie zuvor mit Hilfe eines Maßbands in der Werkzeugkavität vermessen. Es ist darauf zu achten, dass der Zuschnitt immer entlang der

Kettrichtung erfolgt. Der Zuschnitt wird im nächsten Schritt (3) in einem Umluftofen bei 140°C (vgl. Kapitel 5.2.1) erhitzt und anschließend innerhalb von 5 s in einen lasergesinterten Werkzeugstempel übergeben (4). Der Stempel schließt (4) und der Zuschnitt wird bei gleichzeitigem Andruck der Negativform für eine Dauer von 30 s geformt (5). Währenddessen können überstehende Bereiche entlang der Stempelkontur im Detailzuschnitt abgetrennt werden (5). Im letzten Schritt wird der Werkzeugstempel wieder geöffnet und der Einleger von der Positivseite des Werkzeugstempels entnommen (6). Es liegt ein konturnah vorgeformter und fertig beschnittener Einleger vor (7). Der Polymerüberzug des Gewebes sorgt für den Erhalt der Form des Einlegers.

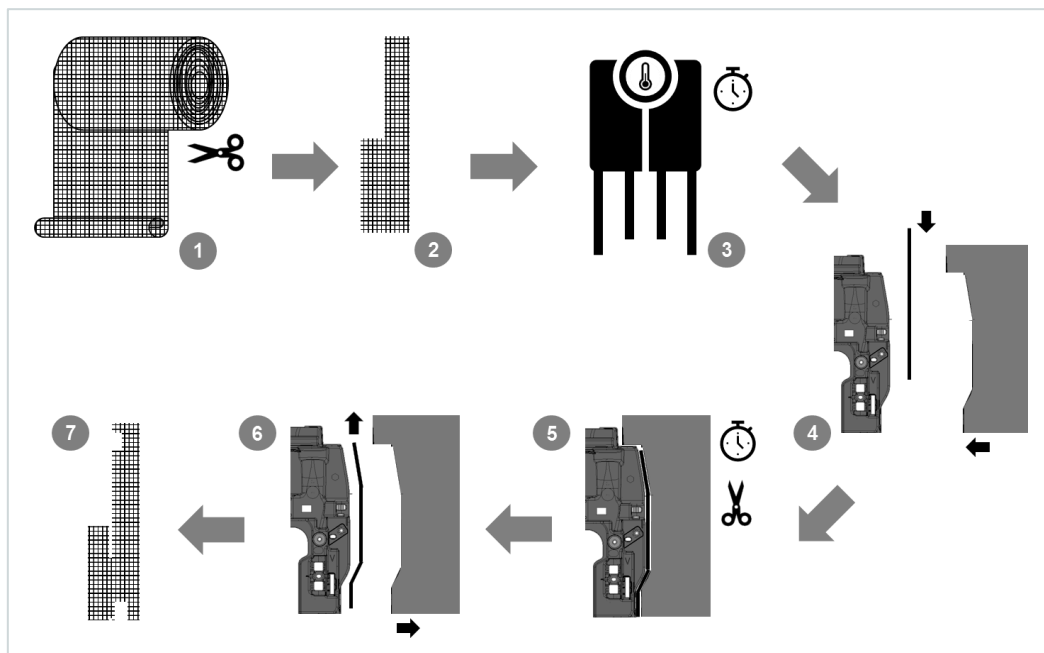


Abb. 105: Schematische Abbildung der Verfahrensschritte des Preformprozesses

➤ Positionierung im Werkzeug

Im Anschluss an den Preformprozess werden die Einleger im Spritzgusswerkzeug positioniert. Für die wissenschaftliche Bewertung der Wirksamkeit innerhalb der KUM erfolgt dieses von Hand. Im Serienbetrieb ist eine Automatisierung durch einen Greifer im selben Prozessschritt mit dem Einlegen der Gewindeinserts in das Werkzeug denkbar. Der Fasereinleger wird im Werkzeug über drei Schieber fixiert (Abb. 106). Diese werden in der aktuellen Serienfertigung beim Schließen des Werkzeugs über Schrägsäulen mechanisch in Spritzposition gebracht und dienen der Realisierung von Hinterschnitten für spätere Montageanwendungen. Für die Bemusterung der Versuchsbauteile werden die Schrägsäulen entfernt, um die individuelle Bewegung der Schieber zu ermöglichen. Im oberen Schieber befindet sich ein federgelagerter Stift, an dem der Fasereinleger eingehängt wird. Beim Schließen des Schiebers wird der Stift bis auf die Bauteil-

wandstärke von 2,5 mm eingedrückt, sodass der Einleger weiterhin fixiert bleibt, der Schieber jedoch vollständig geschlossen werden kann.

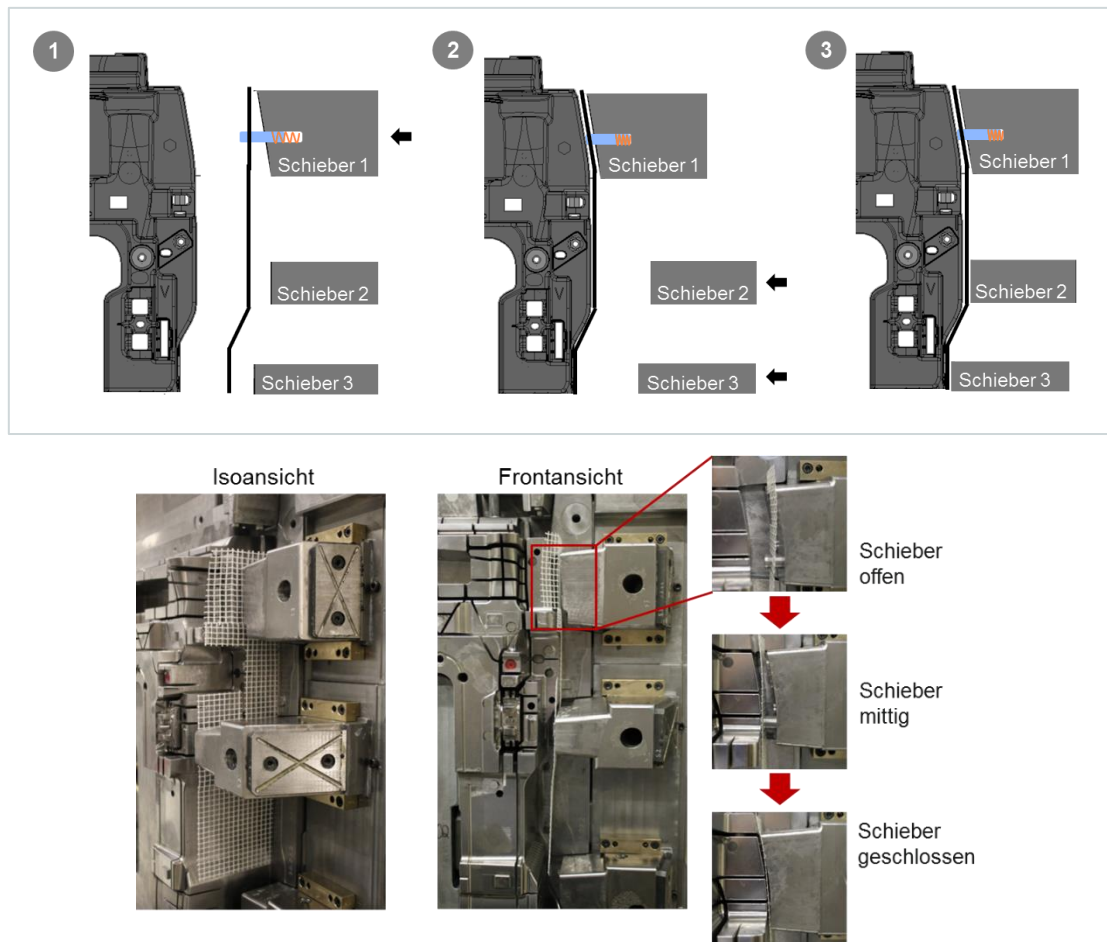


Abb. 106: Positionierung der Fasereinleger im Spritzgusswerkzeug; schematische Darstellung (oben) und Detailaufnahme im Werkzeug (unten)

➤ Musterung anhand 2² Versuchsplan

Um die Verarbeitung und das Verhalten der Gittergewebe in komplexen Bauteilgeometrien zu untersuchen, erfolgt ein zweiter Kreuzversuch. Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 5.3, ist der Versuchsplan der FVK-KUM Musterung auf 2² Faktoren gekürzt. Der Faktor Massetemperatur entfällt, da die besten Ergebnisse durchgängig mit einer Massetemperatur von 260°C erzielt wurden. Tab. 32 zeigt den Versuchsplan der FVK-KUM. Der Faktor Werkzeugtemperatur (Faktor A) bildet seine Ausprägungen mit 20°C und 60°C aus. Dabei ist 20°C die aktuelle Werkzeugtemperatur, welche in der Serienherstellung des KUM gefahren wird. Der Wert 60°C beschreibt die maximale, im Verarbeitungsdatenblatt angegebenen Werkzeugtemperatur für die Spritzgussmatrix. Die Einspritzgeschwindigkeit (Faktor B) besitzt ein Minimum mit 55 mm/s und ein Maximum mit 110 mm/s. Bei geringer Einspritzgeschwindigkeit liegt eine schonende Materialverarbeitung vor. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Spritzgussmatrix bei niedriger Ein-

spritzgeschwindigkeit gepaart mit geringer Werkzeugtemperatur vorzeitig erstarrt und das Bauteil nicht komplett füllt. Ebenso ist zu erwarten, dass sich die Viskosität der Matrix auf Grund der geringen Einspritzgeschwindigkeit erhöht und ggf. den Einleger zusammenschiebt bzw. Rovings aus dem Gewebe löst. Weiterhin ist bei der niedrigen Einspritzgeschwindigkeit die längere Füllzeit zu beachten, die sich direkt auf die Zykluszeit auswirkt. Bei einer erhöhten Einspritzgeschwindigkeit ist eine schnelle Formteillfüllung und somit eine geringere Zykluszeit zu erwarten.

Tab. 32: Versuchsplan der FVK-KUM Musterung mit Faktoren und Ausprägungen

Versuchsnummer	A	B	
1	-	-	
2	-	+	
3	+	+	
4	+	-	
Faktoren	Kürzel	Minimum [-]	Maximum [+]
Werkzeugtemperatur	A	20°C	60°C
Einspritzgeschwindigkeit	B	55 mm/s	110 mm/s

Bei der ersten Musterung werden die Einleger, wie zuvor beschrieben, pregeformt und auf dem gefederten Stift am oberen Schieber auf der beweglichen Seite positioniert. Nach dem manuellen Schließen der Schieber ist zu erkennen, dass sich die Einleger auf Grund der Eigensteifigkeit, der komplexen Kontur und einem unzureichenden Preforming nicht an einer Werkzeugwand ablegen, sondern sich innerhalb der Wandstärke bewegen können. Das heißt, dass die Einleger bei geschlossenen Schiebern sowohl die rechte als auch die linke Kavitätswand berühren. Es besteht demnach Optimierungsbedarf bei der konturnahen Formung und der Positionierung der Einleger. Es ist möglich, dass die Temperatur während des Preformprozesses durch den vorherigen Übergabeschritt und die geringe Materialstärke nicht ausreichend hoch ist. So ist im Anschluss an den Spritzgussprozess erwartungsgemäß zu beobachten, dass sich die Fasereinleger im fertigen Bauteil unregelmäßig an Ober- und Unterseite des KUM abzeichnen. Dabei ist der Füllprozess wie folgt vorstellbar:

1. Spritzgussmasse strömt von Obergurt in Seitengurte und erfasst oberes Ende des Einlegers
2. Oberes Ende wird umschlossen und gleichzeitig gegen Werkzeugwand gedrückt
3. Einleger fungiert weiter als Hindernis in der Kavität, sodass nachströmende Masse entlang seitlicher Rippenstrukturen voreilt

-
4. Vorgeeilte Spritzgussmasse erfasst unteres Ende des Einlegers und drückt es an die andere Werkzeugwand
 5. Einleger ist an beiden Werkzeugwänden fixiert, sodass nacheilende Masse den Einleger diagonal durchströmt → Einleger ist ungleichmäßig im Bauteil eingebettet.

➤ **Optimierung des Preformprozesses**

Dieser Füllverlauf und das entsprechende Verhalten des Einlegers sind nachteilig gegenüber der geforderten Reproduzierbarkeit im Serieneinsatz anzuführen. Um das Preforming weiter zu optimieren, werden die Fasereinleger in der zweiten Schleife der ersten Musterung im Werkzeug zusätzlich mit Hilfe einer Heißluftpistole bei 160°C an die Kontur angepasst. Hierzu werden einzelne Bereiche erwärmt, manuell in Form gebracht und anschließend in dieser Position abgekühlt. Es zeigt sich, dass eine Umformung der Gewebe mit PP-Infusion bei Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes $T_{m,PP} = 141^\circ\text{C}$ zu einer verbesserten Abformung des Gewebes führt. Gleichzeitig bleibt die Verschiebefestigkeit des Gewebes ausreichend erhalten, was zeigt, dass die Temperatur innerhalb der Kreuzungspunkte während des Preformings im Werkzeug unterhalb von $T_{m,PP}$ bleibt. Im Gegensatz dazu wirkt sich die Umformung des SBR-5x5 bei erhöhten Temperaturen negativ auf die Beständigkeit des Gewebes aus. Es neigt im zweiten Preformprozess bei genannten Temperaturen zu Farbänderungen. Zudem ist keine nennenswerte Verbesserung der Konturabformung zu verzeichnen, was eine Verarbeitung des SBR-5x5 erschwert. Dies kann auf die elastomerartige Beschichtung ohne Schmelzpunkt zurückgeführt werden, die eine Formänderung bei 160°C nicht zulässt. Zusätzlich zeigt das Drehergewebe eine leichte Verschiebung und Ablösung der Kett- und Schussfäden voneinander, was auf das Schmelzen der Polyester-Binderfäden zurückzuführen ist. Demnach büßt das SBR-5x5 durch den zweiten Preformschritt im Werkzeug einen Teil seiner Verschiebestabilität ein.

➤ **Optimierung der Einlegergeometrie**

Ein entscheidender Einflussfaktor für das Umströmungsverhalten des Einlegers ist seine Geometrie. Abb. 107 zeigt die Änderungen der Einlegergeometrie von der ersten Bemusterung mit dem KUM-Serienstand bis zur optimierten Musterung mit faserverbundgerechter KUM-Geometrie. Die Dimensionierung des Einlegers ist mindestens ebenso groß zu wählen, wie das Abmaß der Metalleinleger im Serienbauteil, um eine ausreichende Bauteilstabilisierung im Sensorbereich zu gewährleisten. Allgemein ist festzuhalten, dass die Komplexität der Einlegergeometrie zwischen der ersten und dritten Musterung abgenommen hat. Bei der ersten Musterung wird mit dem aktuellen Serienstand des KUM gearbeitet, um zu überprüfen, ob eine kurzfristige Substitution der Metalleinleger durch Gittergewebe in der Serie machbar ist. Anhand der sche-

matischen Abbildung des Einlegers in Abb. 107 ist zu erkennen, dass für eine Verstärkung der aktuellen KUM-Seriengeometrie eine komplexe Einlegerform notwendig ist. Für die erste Musterung bedeutet dies eine erhöhte Zuschnitt- und Preformzeit. Für die Bereitstellung in der Serie würde sich demnach der Preis der Einlegerzuschnitte erhöhen. Weiterhin stellt die Positionierung und Verarbeitung der Einleger in dem Serienwerkzeug eine Herausforderung dar. Die Positionierung erfolgte über doppelseitiges Klebeband, was dazu führt, dass das Werkzeug nach jedem Schuss von Kleberresten befreit werden muss. Dieser zusätzliche Schritt (Material, Reinigungszeit) schlägt sich auf die Bauteilkosten nieder. Bei den hergestellten Bauteilen zeichnen sich die Fasereinleger unregelmäßig an Ober- und Unterseite ab, sodass der Prozess nicht reproduzierbar ist. Weiterhin ist auch ein automatisiertes Handling auf Grund der komplexen Geometrie auszuschließen. Es ist demnach festzuhalten, dass eine kurzfristige Substitution der Metalleinleger durch Gittergewebe innerhalb der aktuellen Seriengeometrie nicht möglich ist.

Die zweite Musterung erfolgt bereits in dem umkonstruierten FVK Werkzeug. Durch die Umgestaltung konnte die Einlegergeometrie und der damit zusammenhängende Vorformprozess vereinfacht werden. Die Positionierung im Werkzeug erfolgt über den federgelagerten Stift im oberen Schieber, was die Basis für einen automatisierten Prozess liefert. Die entsprechende Serienlösung mit Hydraulikschiebern wurde bereits diskutiert. Weiterhin ist eine gleichmäßige Einbettung der Einleger an der Bauteiloberseite zu erkennen, welche einen reproduzierbaren Prozess nachweist. Der stufenartige Einleger kann als Rollenware für die Serie bereitgestellt werden, wobei die Geometrie einen Teilbereich als Verschnitt kennzeichnet.

Diese Verschnittoptimierung wird in der dritten Musterung aufgegriffen, indem der Einleger auf eine rechteckige Form reduziert wird. Demnach ist eine preisgünstige Materialbeschaffung ohne zusätzliche Konturanpassungen möglich. Der Längenzuschnitt könnte in der Serie über eine Schneidklinge von dem Handlingsroboter durchgeführt werden. Die Positionierung und Vorformung erfolgt wie in der zweiten Musterung. Anhand der hergestellten Bauteile können auch hier Reproduzierbarkeit und Automatisierbarkeit sichergestellt werden. Es ist jedoch zu prüfen, ob die vereinfachte Geometrie des Einlegers ausreichende Verstärkungseigenschaften mit sich bringt.

Für die Herstellung der Musterbauteile werden die Einlegergeometrien aus der zweiten und dritten Musterung gewählt. Beide Geometrien reichen dabei über die Länge des Metalleinlegers hinaus bis in den unteren Bereich des KUM. Das Gewicht für die jeweiligen Einleger ist der Tab. 33 zu entnehmen.

Tab. 33: Gewicht der Einleger aus unterschiedlichen Gittergeweben

Gittergewebe	Flächengewicht [g/m²]	Gewicht breiter Einleger 2. Musterung [g]	Gewicht schmaler Einleger 3. Musterung [g]
SBR-5x5	230	8,13	5,82
PP-3x3	300	9,53	6,96
PP-6x6	200	7,04	4,97

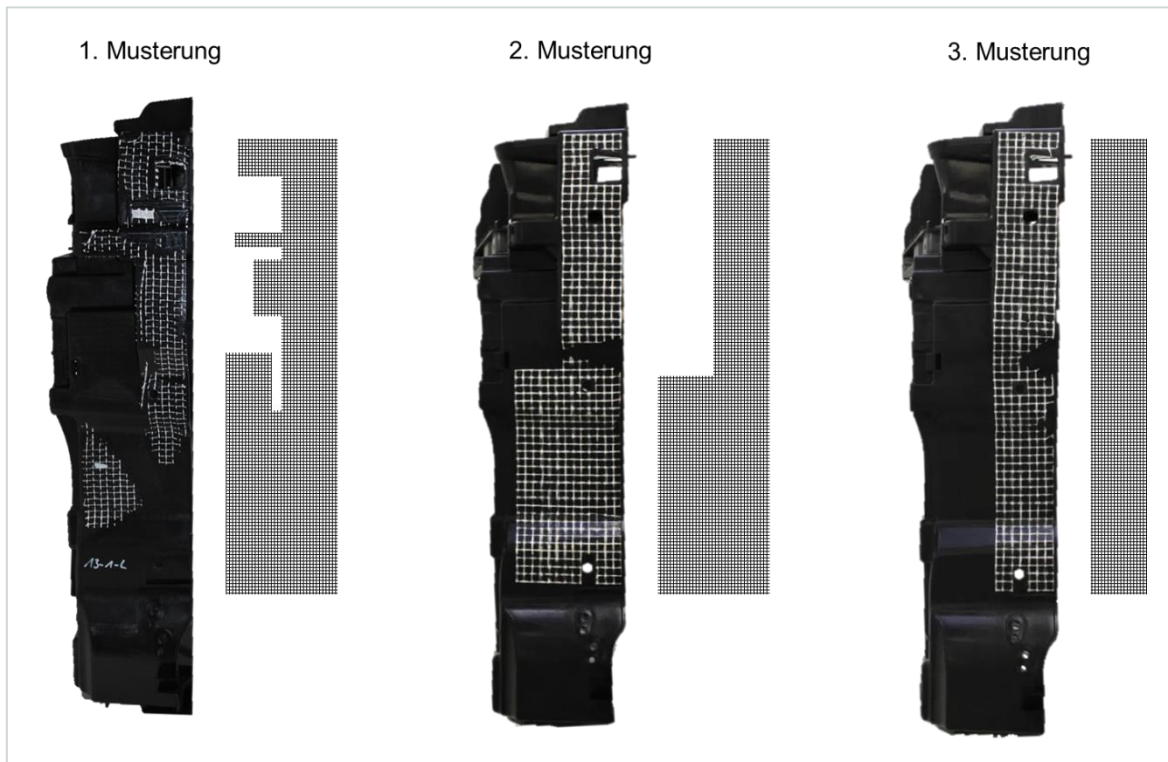


Abb. 107: Änderungen der Einlegerzuschnitte; 1., 2., 3. Musterung

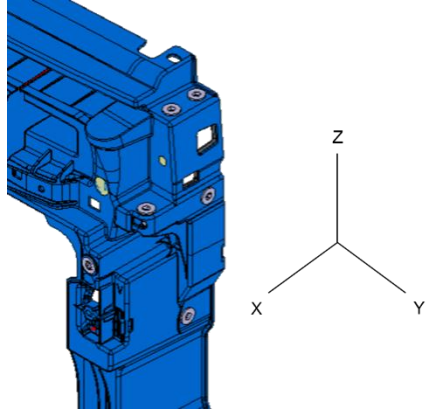
5.5.5 Beeinflussung des Spritzbilds durch unterschiedliche Parameter

Über die unterschiedlichen Kombinationen der Prozessparameter wird das Spritzbild bzw. die Lage der Gittergewebe direkt verändert. Diese Beeinflussung wird über die Verschiebung der Einleger abgebildet. Die gemessenen Verschiebungen in X, Y, Z sind als Mittelwerte in Tab. 34 aufgeführt. Die Achsdefinition ist der Abbildung innerhalb der Tabelle zu entnehmen. Anhand der Verschiebungen ist grundsätzlich zu erkennen, dass die Einstellungen der Versuchsnummer 3 die geringsten Verschiebungen der Einleger und somit die beste Parameterauswahl darstellt. Hingegen weist die Versuchsnummer 1 die höchsten Verschiebungen auf. Ebenfalls ist zu erkennen, dass das Gittergewebe PP-6x6 am besten zu verarbeiten ist, da es die größte Formstabilität nach dem Preformprozess und die geringsten Verschiebungen in der Kavität zeigt. Diese Tatsache ist auf die grobmaschige Strukturierung und den damit zusammenhängenden niedrigen Faseranteil (geringe Fließbehinderung) des Einlegers zurückzuführen. Das SBR-5x5 indes zeigt allgemein hohe Verschiebungen innerhalb der Kavität. Der Grund hierfür ist die hohe Eigenstei-

figkeit, bedingt durch das doppelte Kettfadensystem und die SBR Schlichte. Bestätigt wird diese Erwartung auch durch die ungenügende Abformung im Preformprozess.

Tab. 34: Verschiebungen der Gewebereinleger (schmal) in Abhängigkeit von Werkzeugtemperatur und Einspritzgeschwindigkeit

Material	Versuchsnummer	Verschiebung [mm]		
		X	Y	Z
SBR-5x5	1	1,7	2,5	1,4
	2	1	2,5	1,0
	3	0,9	0	0,5
	4	0,5	2,5	0,8
PP-3x3	1	1,4	2,5	0
	2	1,2	1,25	0
	3	0	0	0
	4	0	2,5	0
PP-6x6	1	1,1	1,25	0
	2	0,8	1,25	0
	3	0	0	0
	4	1	0	0



Wie Tab. 34 zeigt, nimmt die Verschiebung in Y-Richtung auf Grund der Fixierung innerhalb der Kavität lediglich die Werte 0 (nicht verschoben), 2,5 (auf die Innenseite des Bauteils verschoben) und 1,25 (nicht sichtbar → eingebettet) an. Ebenfalls ist die Verschiebung der Einleger in Z-Richtung begrenzt. Durch die Klemmung der Schieber und Positionierhilfe des gefederten Stifts, ist ein Ausschwämmen oder Verschieben der Einleger in Fließrichtung nur bedingt bis gar nicht möglich. Demzufolge sind auch hier nur begrenzt Abhängigkeiten zu erkennen. Abb. 108 zeigt die Verschiebungen der Einleger angeordnet im dreidimensionalen Raum. Die einzelnen Parameterpaarungen sind entsprechend der Versuchsnummern gekennzeichnet. Bei der Anordnung fällt auf, dass die Gittergewebe mit PP-Infusion (blau und grün) in Z-Richtung nicht verschoben werden. Das Gewebe SBR-5x5 hingegen zeigt bei nahezu jeder Anordnung eine Verschiebung über alle drei Achsen. Im Vergleich der Parametereinstellungen untereinander ist zu sehen, dass Versuchseinstellung 3 mit hoher Werkzeugtemperatur und hoher Einspritzgeschwindigkeit keinerlei Verschiebungen für PP-3x3 und PP-6x6 hervorruft. Die Paarungen 1 und 2 (niedrige Werkzeugtemperatur und variierende Einspritzgeschwindigkeit) hingegen weisen den größten Verschiebungseinfluss von bis zu 1,7 mm in X-Richtung auf. Es ist zu erwarten, dass die geringe Einspritzgeschwindigkeit gepaart mit einer niedrigen Werkzeugtemperatur die Viskosität der Schmelze soweit erhöht, dass die Gittereinleger mit dem Schmelzeffluss mitgezogen bzw. zusammengeschoben werden. Ein ähnliches Verhalten ist bei gleichen Parameterein-

stellungen bereits bei der Plattenmusterung aufgetreten. Die Gittergewebe fungieren in diesem Zusammenhang als Störfaktor. Hinzu kommt eine unzureichende Positionierung in Bauteildicke (Y-Richtung). Ein mögliches Lösungskonzept für eine genauere Positionierung und ein serientaugliches Handling ist dem Kapitel 5.5.4 zu entnehmen. Wird der gesamte Seitengurt über einen Schieber abgebildet kann ein prozesssicheres Einlegen ohne Preformprozess gewährleistet werden. Zusätzlich können aufgebrachte Rippen im Einlegerbereich unterstützen, das Gewebe besser einzubetten und zu festigen.

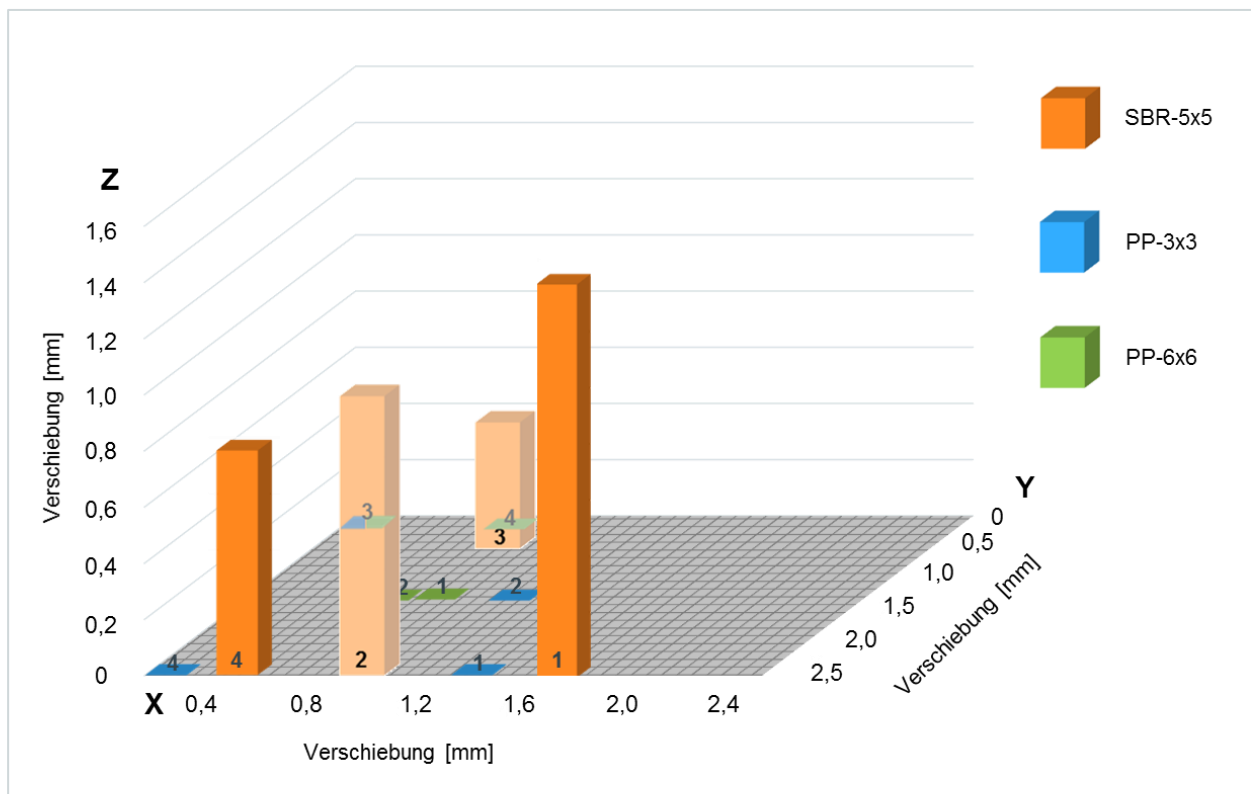


Abb. 108: Verschiebungen der Gittereinleger im dreidimensionalen Raum

5.5.6 Beurteilung der Erkenntnisse aus der KUM-Musterung

Die aktuelle Seriengeometrie des KUM erlaubt keine direkte Substitution der Metalleinleger durch Gittergewebe (vgl. Abb. 107). Weder ein automatisierter noch ein reproduzierbarer Verarbeitungsprozess ist in diesem Fall abbildbar. Demnach ist eine faserverbundgerechte Konturänderung im Werkzeug vorzunehmen. Gleichsam vereinfacht sich auch die Einlegergeometrie der Gittergewebe.

➤ Werkzeug und Einleger

Die Werkzeugänderung wird ohne Beeinträchtigung des Bauraums durchgeführt. Die Radien werden vergrößert sowie einige Bauteilwände versetzt, um eine gleichmäßige Einlegerkontur zu generieren. Ein gefederter Stift im Werkzeug fungiert als Positionierhilfe, was die Basis für eine

automatisierte Einlegerbestückung im Werkzeug bildet. Die Geometrie der Gittergewebe steht in direktem Zusammenhang mit der Kontur des Einlegerbereichs im Spritzgusswerkzeug. Durch die abgeänderte Kontur ist die Umformung im Werkzeug gering und der Einleger wird wenig beansprucht. Weiterhin bedeutet eine vereinfachte Einlegergeometrie weniger Verschnitt und ein verbessertes Handling im Herstellungsprozess. Eine automatisierte Bestückung ist mit den Geometrien aus Musterung 2 und 3 problemlos möglich.

➤ **Herstellungsprozess**

Die Ergebnisse des Preformprozesses spiegeln sich in der Herstellung der KUM wieder. Das Preformen wird für die Versuchsreihen um einen weiteren Abformprozess im Werkzeug erweitert, um eine erhöhte Konturgenauigkeit der Abformung zu erzielen und eine gleichmäßige Einbettung im Bauteil zu erreichen. Für einen automatisierten Serienprozess müssen die Seitengurte über jeweils einen Hydraulikschieber bedient werden, um reproduzierbare Einlegebedingungen zu schaffen. Die Moldflow Untersuchung dient als Anhaltspunkt für die Erstellung des Spritzprogramms sowie die Steuerung der Kaskaden. Den Erwartungen entsprechend, bestätigen sich die Parametereinstellungen der Plattenmusterung auch für die Musterung im KUM-Werkzeug. Es zeigt sich, dass eine erhöhte Massetemperatur sowie eine hohe Einspritzgeschwindigkeit die besten Ergebnisse liefern. Diese Aussage ist unter wirtschaftlichen Aspekten als positiv zu betrachten, da eine hohe Einspritzgeschwindigkeit und die erhöhte Werkzeugtemperatur die Bauteileigenschaften optimiert. Nachteilig sind die verlängerten Kühlzeiten auszulegen, die sich jedoch auf Grund der Bauteildicke nur unwesentlich erhöhen. Ebenso würde eine zusätzliche Abkühlphase während des Bestückens der Kavität mit Nieten und Einlegern entstehen. Ein anderer Lösungsansatz ist der Aufbau eines Doppelwerkzeugs mit zwei Kavitäten. So können Zyklus- und Kühlzeit auf zwei Bauteile umgelegt werden. Die Herstellkosten für ein Doppel-KUM-Werkzeug übersteigen den Preis des Einzelwerkzeugs um einen Faktor von 1,7-1,8. Je nach Produktionsvolumen ist ein Doppelwerkzeug dem Bau eines zweiten Einzelwerkzeugs und der Anschaffung einer zweiten Spritzgussmaschine vorzuziehen.

5.6 Eigenschaftsnachweis der Gittergewebe in freigaberelevanten Bauteilversuchen

Das Schema aus Abb. 109 zeigt den letzten Entwicklungsschritt des Bauteilentwicklungsstrangs. Die gefertigten FVK-Bauteile werden den unterschiedlichen Freigabeproofungen unterzogen, wobei in dem vorliegenden Fall für das Beispielbauteil KUM die Prüfung der Crashtauglichkeit unter dynamischer Belastung im Fokus liegt. Die Ergebnisse hieraus lassen Rückschlüsse auf die Serientauglichkeit der gittergewebeverstärkten KUM zu.

Erarbeitung des Substitutionspotentials

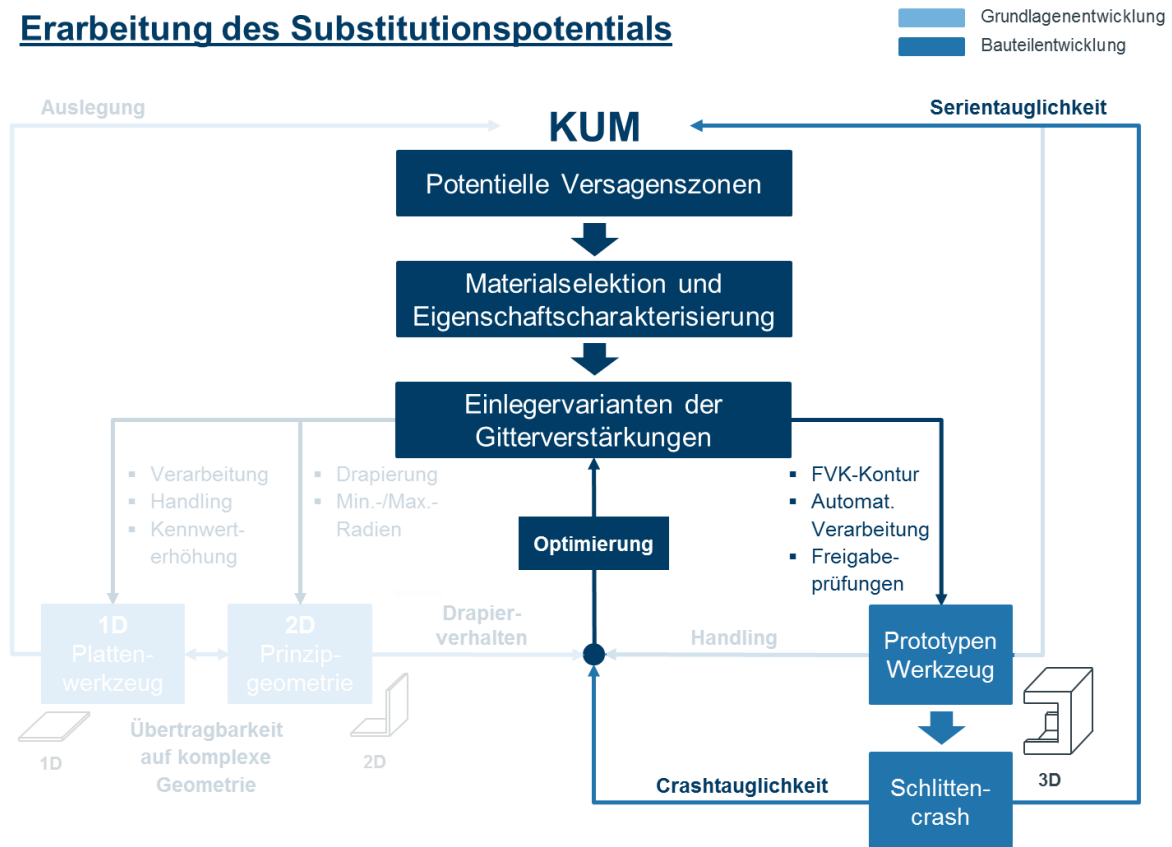


Abb. 109: Systematischer Aufbau der Entwicklungsstruktur – Überprüfung der Performance eines gittergewebeverstärkten KUM unter anderem über die dynamische Belastung im Schlittencrash

In nachfolgendem Kapitel werden die Bauteiluntersuchungen als Nachweis an den gemusterten FVK-KUM durchgeführt. Auf Basis der vorherigen Parametereingrenzung (vgl. Kapitel 5.5.5) werden die KUM nach den Einstellungen von Versuchsnummer 3 hergestellt. Diese beinhalten eine erhöhte Massetemperatur und eine erhöhte Einspritzgeschwindigkeit. Bei der komplexen Geometrie des KUM ist die erhöhte Massetemperatur und die damit zusammenhängende niedrige Viskosität der Masse von Vorteil, um die Spritzdrücke bei der Bauteilfüllung gering zu halten. Zusätzlich garantiert die erhöhte Einspritzgeschwindigkeit zusammen mit der hohen Massetemperatur eine schnelle und vollständige Füllung. Diese beiden Aspekte sind für die Unversehrtheit des Gittergewebes von Vorteil.

Der Fokus der Bauteiluntersuchungen liegt auf dem Crashversuch. Er dient der Überprüfung und Einschätzung der Performance des FVK-KUM unter dynamischer, crashähnlicher Beanspruchung. Dieser Versuch bildet im Rahmen der Arbeit den Nachweis der Crashtauglichkeit und nimmt somit die bauteilbezogene Aufgabenstellung von Beginn der Arbeit wieder auf. Es ist zu erwarten, dass die Einleger mit PP-Infusion auf Grund der guten Haftung die beste Performance erzielen. Durch die Interaktion zwischen Faser und Matrix besteht eine Krafteinleitung in den Verbund, wie die Untersuchungen aus Kapitel 5.2.4 und 5.4 nachweisen. Weiterhin ist der er-

höhte Faseranteil des PP-3x3 ein Indiz für die Erhöhung der Verbundeigenschaften, was u.a. das Kapitel 5.4 bestätigt. Die darauffolgenden Bauteilfreiprüfungen werden aus wirtschaftlichen Gründen lediglich an dem FVK-KUM durchgeführt, deren Material und Einlegegeometrie die beste Performance im Schlittencrash aufweist.

5.6.1 Schlittencrash

Der Schlittencrash erfolgt auf einer kleinen Crashbahn und wird an einem metallverstärkten Serien-KUM und an faserverstärkten Montageträgern mit schmalem und breitem Einleger durchgeführt. Die Ausnahme bildet die SBR-5x5 Verstärkung, die verarbeitungsbedingt nur in der breiten Einlegervariante reproduzierbare Bauteile liefert. Für die Versuche werden ZSB verwendet, die neben dem KUM unter anderem aus der Kühlereinheit, dem Elektrolüfter, dem Querträger und dem Fußgängerschutz bestehen. Der ZSB wird vor den Rollbock gebaut und dient als Orientierung und Ausrichtungspunkt für den Impaktor. Der Impaktor (EPP-Schaumblock) wird entsprechend der Höhenlage des ZSB vor der Aufprallwand ausgerichtet und befestigt. Anschließend wird der Rollbock zum Ende der Bahn in seine Startposition gezogen und über ein motorgetriebenes Seil gespannt. Durch das Auslösen des Crashvorgangs wird die Masse des Rollbocks (~480 kg) über das Seil beschleunigt und auf eine Geschwindigkeit von maximal ~12,5 km/h (entspricht ~3,4 m/s) bis zum Aufprallzeitpunkt gebracht. Zur Detektion des Crashfalls befindet sich an der Verbindungsstelle zwischen KUM und dem Querträger ein etwa 20 mm breites Langloch (siehe Abb. 110). Über die Verschiebung der Verbindungsschraube beim Aufprall ist der KUM damit in Längsrichtung beweglich. In der Serie ist die Schraube gleichzeitig direkt mit dem Metalleinleger verbunden und wird dadurch zusätzlich stabilisiert.

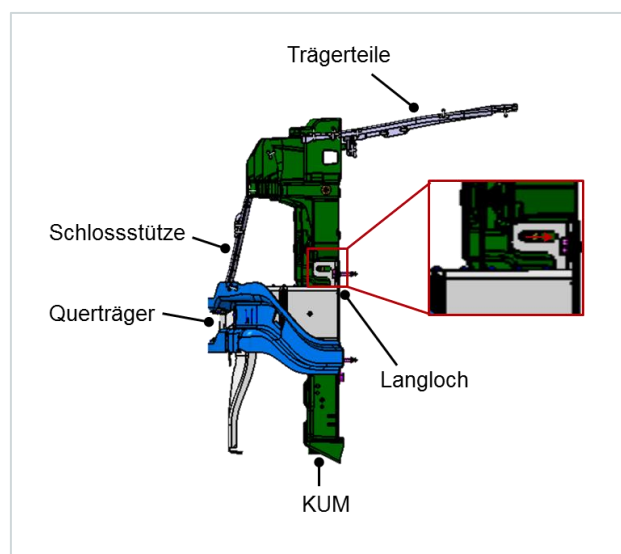


Abb. 110: KUM-ZSB mit Langlochverbindungsstelle [59]

Beim Aufprall ist vor allem eine definierte Langlochbewegung (horizontale Bewegung des Sensors) erwünscht. Gleichzeitig sollte die vertikale Bewegung des Sensors vergleichsweise geringer ausfallen. Im Vergleich zu dem Abbremsverhalten des Rollbocks muss ein verstärktes Abbremsverhalten (Negativbeschleunigung) des KUM erfolgen, um eine Tendenz bzgl. Auslöseverhalten des Airbags bei höheren Geschwindigkeiten zu treffen. Laut Literatur (vgl. Kapitel 3.2) erfolgt das Signal zur Airbagauslösung bei einer Aufprallgeschwindigkeit zwischen 25-30 km/h innerhalb der ersten 10-15 ms nach Aufprall. Da die Aufprallgeschwindigkeit in diesem Versuchsaufbau geringer ist, wird die relevante Zeitspanne für die Signalgebung auf 30 ms festgesetzt. Folglich ist innerhalb der ersten 30 ms nach Aufprall ein Bruch des Montageträgers im Sensorbereich und eine daraus resultierende unkontrollierte Bewegung unzulässig.

Um einen Eindruck von der Verformung des KUM und der Verschiebung des linken Sensors (Fahrerseite) zu erhalten, zeigt Abb. 111 den Geschwindigkeitsverlauf sowie die Auslenkung des linken Crashsensors von einem Serien-KUM. Zusätzlich ist auch der Geschwindigkeitsverlauf des Rollbocks dargestellt. Die Geschwindigkeit in m/s (Ordinate) ist über der Zeit in ms (Abszisse) aufgeführt. Die Kurvenverläufe werden durch die grafische Auswertung einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit einer Bildrate von 5000 Bildern pro Sekunde unterstützt. Die Position der Beschleunigungssensoren wird über deren triaxiale Beschleunigung bestimmt. Erfährt der Sensor eine impulsartige Beschleunigung, kann über den gemessenen Wert der Weg als Verschiebung zur Ausgangsposition ermittelt werden. Zum Aufprallzeitpunkt ($t = 0$ ms) beträgt die Geschwindigkeit der Barriere etwa 3,4 m/s. Die Sensoren befinden sich zu diesem Zeitpunkt noch in der Ausgangsposition. Bis etwa 12 ms nach dem Aufprall findet eine Verformung des Fußgängerschutzes statt. Im Anschluss beginnt die Langlochverschiebung (44 ms) und somit die horizontale Verschiebung des KUM entlang der Fahrzeuglängsachse bis etwa 76 ms nach dem Aufprall. Der Sensor verschiebt sich dabei etwa 28 mm in die horizontale Richtung (X-Richtung) und 3 mm in die vertikale Richtung (Y-Richtung). Nach 87 ms bricht der Seitengurt des KUM, sodass der Impaktor noch weiter ins Bauteil dringt, bis er bei 116 ms vollständig zum Stillstand kommt und in entgegengesetzte Richtung beschleunigt. Nach 272 ms hat sich der Impaktor wieder vollständig von dem Bauteil abgelöst und zeigt damit das Ende des Crashvorgangs an. Die maximale Auslenkung des Sensors beträgt 69 mm in X-Richtung und 15 mm in Y-Richtung. Im Vergleich zu der Kurve des KUM mit Metalleinleger, zeigt die Kurve des Rollbocks einen gleichmäßigen Geschwindigkeitsabbau bishin zur Rückfederung und negativen Beschleunigung.

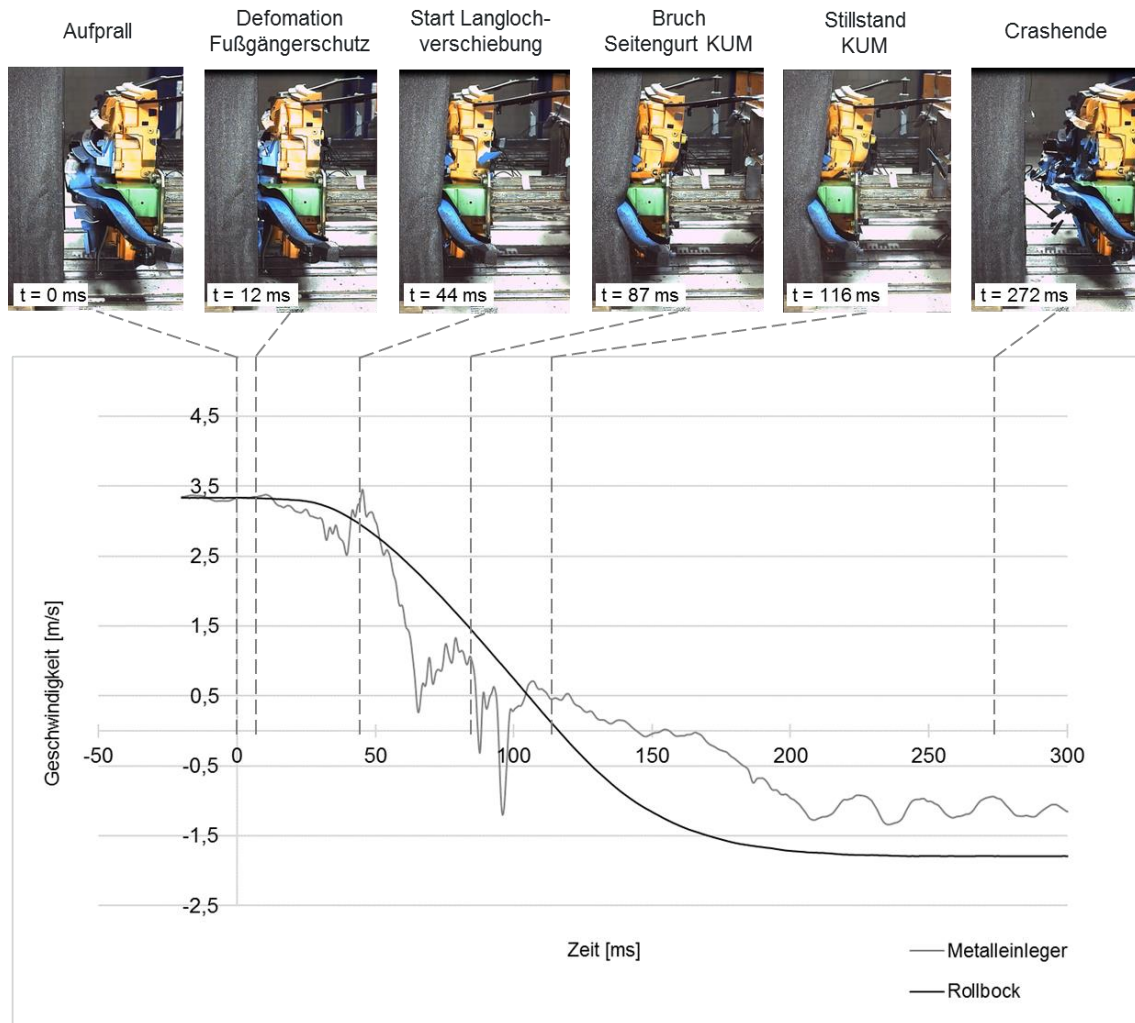


Abb. 111: Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am Serien-KUM

Als Basis für die Auswertung der Crashversuche dient die gemessene Geschwindigkeitsänderung des Sensors Fahrerseite im KUM im Vergleich zu der Geschwindigkeitsänderung des Rollbocks. Der direkte Vergleich der Kurven innerhalb der ersten 30 ms lässt Rückschlüsse auf das Energieaufnahmeverhalten und folglich auf die Verstärkungswirkung der Einleger zu. Abb. 112 zeigt das eben genannte Zeitfenster des Crashversuchs aus Abb. 111 in vergrößerter Form. Es ist zu erkennen, dass bei dem KUM eine Abbremsung auf $\sim 3,04$ m/s (10,94 km/h) erfolgt. Der Rollbock hingegen besitzt zu dem Zeitpunkt noch eine Geschwindigkeit von 3,24 m/s (11,66 km/h). Diese Differenz wird als Referenz für die FVK-KUM zugrunde gelegt.

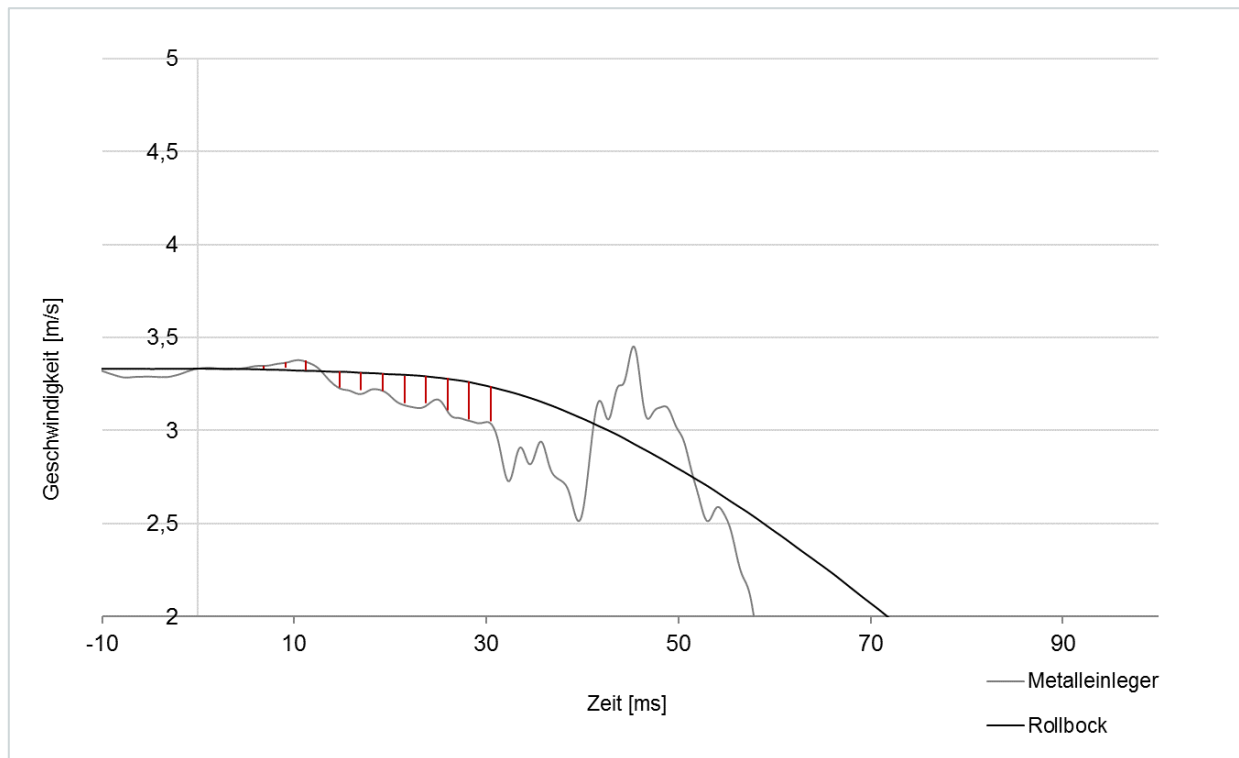


Abb. 112: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am Serien-KUM

Abb. 113 zeigt die Geschwindigkeitsänderung für den Serien-KUM und die SBR-5x5 Verstärkung. Es ist zu erkennen, dass der Kurvenverlauf bis ca. 100 ms ähnlich ist. Der nun auftretende negative Peak der SBR-5x5 Variante kennzeichnet das Versagen des Seitengurts. Dabei biegt sich der Seitengurt bis auf ein Maximum durch und versagt im Anschluss schlagartig, was zu einer abermaligen Geschwindigkeitserhöhung führt. Diese Erhöhung weist darauf hin, dass der Sensor nicht mehr in seiner ursprünglichen Position vorhanden ist. Im Detailbereich in Abb. 114 ist zu erkennen, dass 30 ms nach Aufprall eine geringere Geschwindigkeit (3,017 m/s) wie bei dem KUM mit Metalleinleger vorhanden ist. Folglich würde der Airbag in diesem Versuchsmo-
dell auslösen.

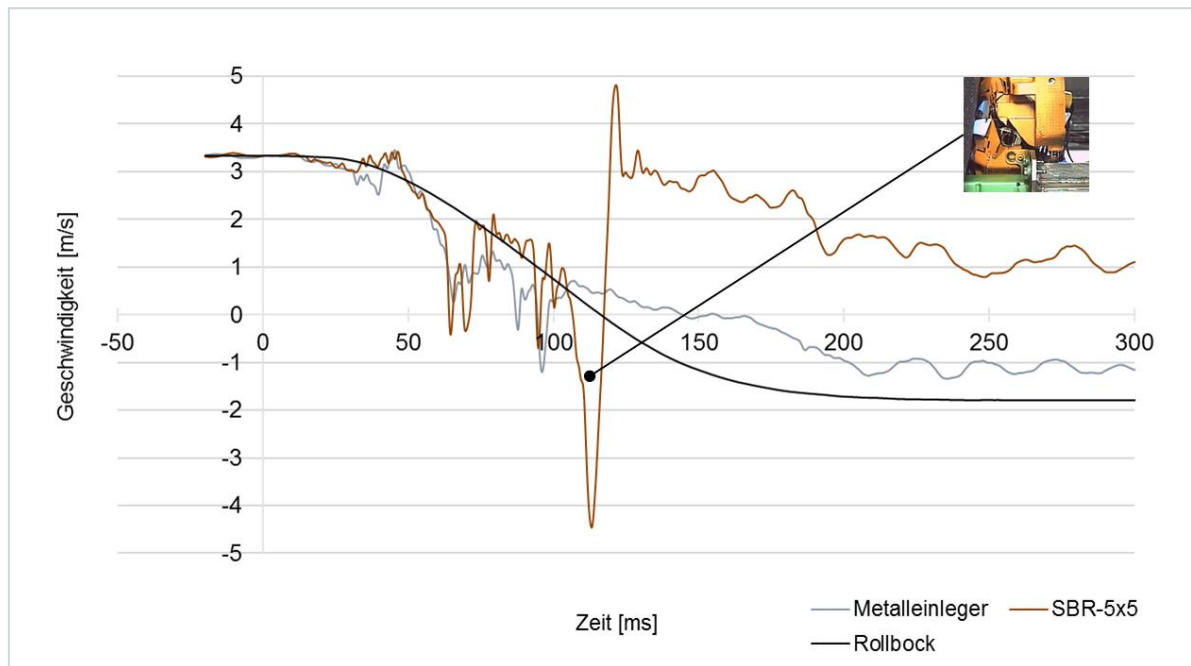


Abb. 113: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung von Metallverstärkung, SBR-5x5 und Rollbock

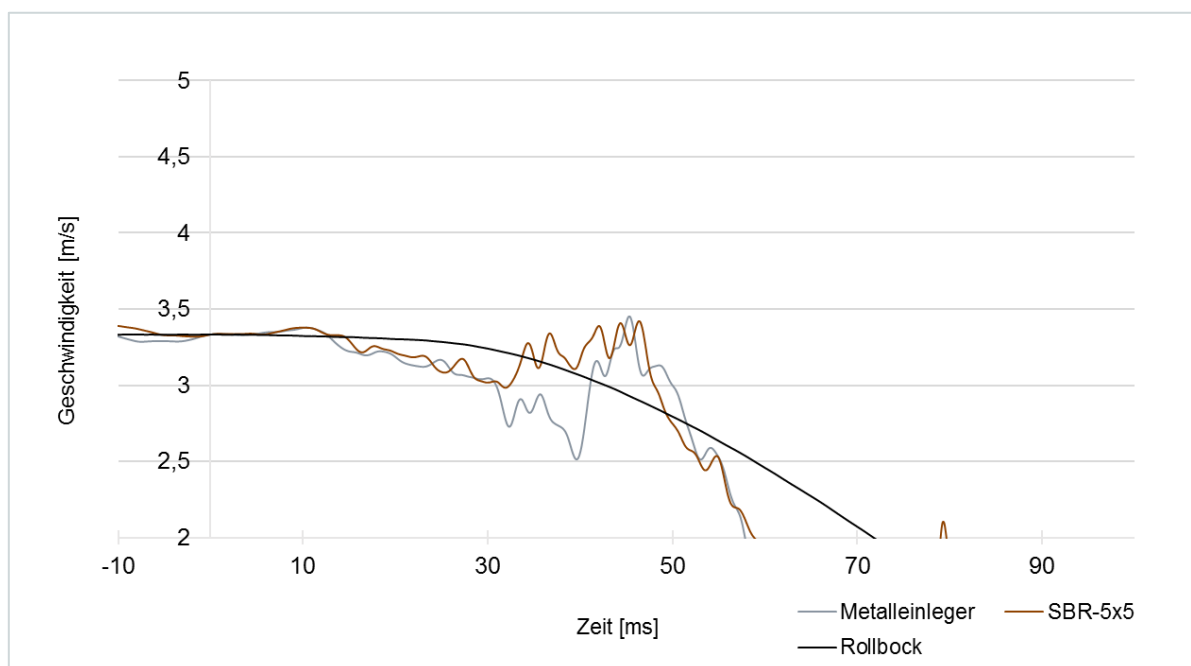


Abb. 114: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am KUM mit SBR-5x5

In Abb. 115 sind die Geschwindigkeitsänderungen des Sensors im Serien-KUM gegenüber der breiten und schmalen Variante mit PP-6x6 dargestellt. Die Kurve des PP-6x6 mit schmaler Verstärkung verläuft ähnlich, wie die des Serien-KUM. Ein signifikanter Unterschied zeichnet sich erst nach knapp 120 ms ab. Zu diesem Zeitpunkt hat der Seitengurt bereits versagt und der Schlitten fährt mit der verbliebenen Geschwindigkeit auf den Impaktor auf. Die Variante mit breitem PP-6x6 Einleger zeigt schon ab 50 ms eine deutliche Abweichung im Geschwindigkeits-

verlauf. Es ist zu erkennen, dass keine Reduzierung der Geschwindigkeit beim Auftreffen stattfindet. Die Langlochverschiebung tritt plötzlich bei ca. 67 ms ein und wird durch einen entsprechenden Peak gekennzeichnet. Durch die ruckartige Verschiebung reißt der Anschraubpunkt aus dem KUM (Abb. 116), bevor eine Verformung oder ein Bruch des Seitengurts und die damit verbundene negative Beschleunigung des Sensors erfolgen kann. Durch das Ausreißen des Anschraubpunkts kann keine Energie mehr auf den KUM und somit in den Verbund übertragen werden. Die Endgeschwindigkeiten bestätigen, ähnlich wie bei der Verstärkung mit SBR-5x5, dass der Sensor nicht mehr in Position ist.

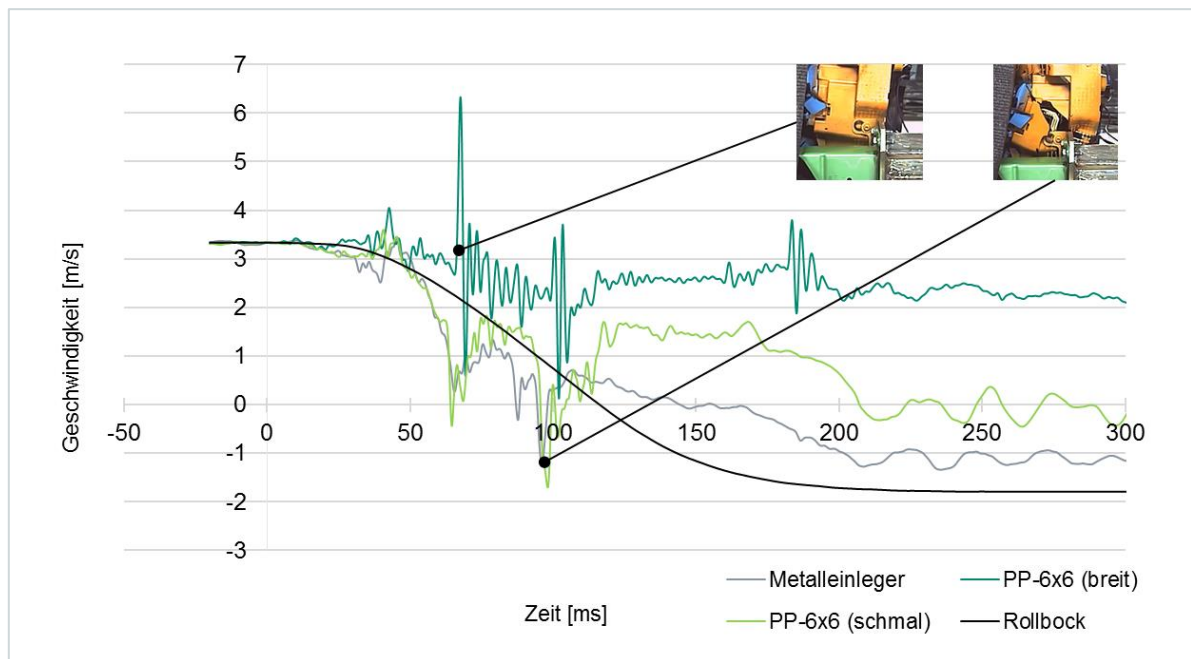


Abb. 115: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung von Metallverstärkung und PP-6x6 (breit und schmal)

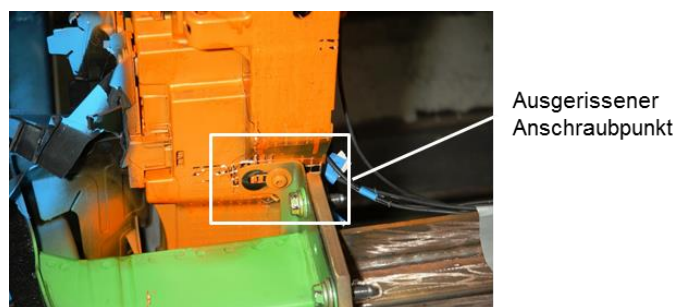


Abb. 116: KUM mit PP-6x6 Einleger (breit) und ausgerissenem Anschraubpunkt nach Crash

Die Detailvergrößerung in Abb. 117 zeigt für den breiten PP-6x6 Einleger in dem Bereich zwischen 0-20 ms nur eine marginale Abbremsung, bevor eine wiederholte Beschleunigung in dem Bereich zwischen 20-30 ms erfolgt. Zu dem Zeitpunkt 30 ms besitzt der KUM mit breitem PP-6x6 Einleger eine Geschwindigkeit von 3,38 m/s, sodass unter den angenommenen Bedin-

gungen keine Signalgebung an den Airbag stattfindet. Für den schmalen Einleger PP-6x6 ist festzustellen, dass eine Geschwindigkeitsreduzierung auf $\sim 3,03$ m/s (10,9 km/h) erfolgt. Im Vergleich zu der Kurve mit Metalleinleger ist demnach von einem Auslösen des Airbags für das dargestellte Versuchsszenario auszugehen.

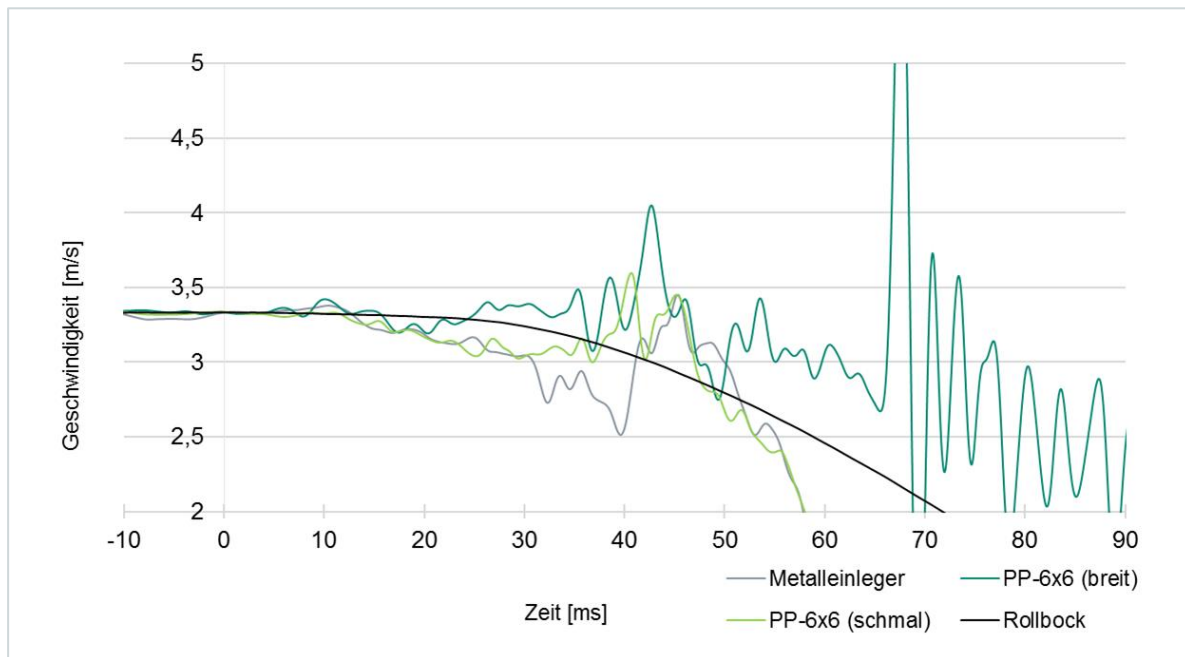


Abb. 117: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am KUM mit PP-6x6 (breit und schmal)

Die Abb. 118 zeigt die Geschwindigkeitsänderung der KUM mit breiter und schmaler PP-3x3 Verstärkung, gemessen am linken Sensor in X-Richtung. Es ist zu sehen, dass die Kurven dem Verlauf der Serie über die gesamte Messung recht ähnlich sind. Bei dem breiten Einleger kennzeichnet ein ausgeprägter positiver Peak im Intervall von ~ 75 -92 ms die Langlochverschiebung. Der zweite auffällige Peak bei ~ 96 ms beschreibt eine negative Geschwindigkeitsänderung durch den Bruch des Seitengurts und ein Ausreißen des Anschraubpunkts. Das PP-3x3 Gittergewebe verhindert trotz Rissbildung ein komplettes Aufbrechen des Seitengurts, wie es bspw. bei dem schmalen PP-6x6 Einleger der Fall ist. Auf Grund der Endgeschwindigkeit ist jedoch bei dem KUM PP-3x3 (breit) zu erkennen, dass der Beschleunigungssensor sich nicht mehr in der ursprünglichen Position befindet.

Auffällig bei dem Geschwindigkeitsverlauf des KUM mit schmaler PP-3x3 Verstärkung ist ein negativer Peak bei etwa 73 ms. Diese Negativbeschleunigung wird durch Aufbrechen des Verbunds und Ausziehen des PP-3x3 Einlegers aus dem Seitengurt hervorgerufen. Dabei wird so viel Energie verbraucht, dass der KUM kurzzeitig auf knapp -2 m/s abgebremst wird. Die übrige Bewegungsenergie beschleunigt den KUM wieder auf ca. 1 m/s. Die Endgeschwindigkeit des

KUM mit schmalem PP-3x3 Einleger liegt bei ca. -0,42 m/s und ist somit nahe dem Niveau der Serie mit Metalleinleger. Die Messung einer negativen Endgeschwindigkeit zeigt, dass der Beschleunigungssensor noch in der ursprünglichen Position vorhanden ist. Die verringerte Endgeschwindigkeit gegenüber der Serie ist ein Hinweis darauf, dass während des Aufpralls mehr Energie von dem KUM absorbiert wurde.

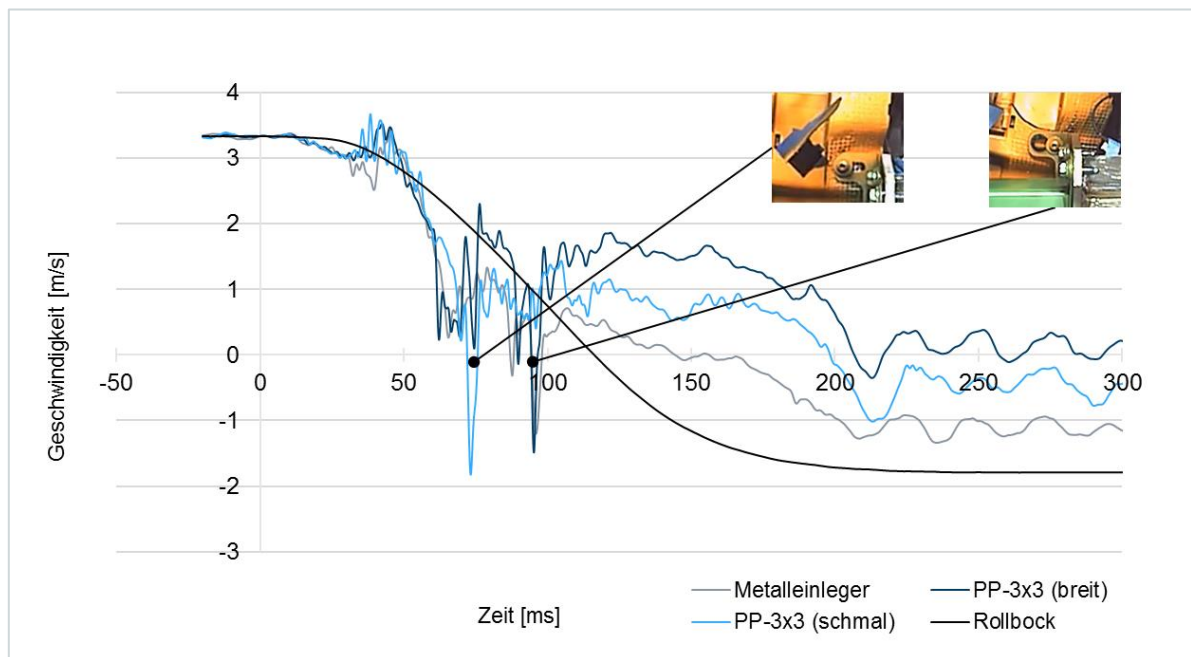


Abb. 118: Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung von Metallverstärkung und PP-3x3 (breit und schmal)

Die Detailaufnahme in Abb. 119 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf von Rollbock, KUM mit Metalleinleger sowie breitem und schmalem PP-3x3 Einleger. In dem Zeitraum bis ~30 ms ist der Verlauf der drei KUM nahezu identisch. Für diesen Versuchsaufbau bedeutet das, dass bei beiden FVK-Varianten eine Signalgebung an den Airbag erfolgen würde. Der darauffolgende Kurvenverlauf gestaltet sich unterschiedlich. Während der KUM mit Metalleinleger im Vergleich zu dem Rollbock weiter an Geschwindigkeit verliert, zeigen die FVK-KUM eine abwechselnden Geschwindigkeitsabbau und -aufbau, ähnlich einer Sinusschwingung. Dieses Verhalten ist teilweise auch bei den anderen FVK-Varianten zu beobachten und deutet auf das Auslösen der Rovings aus dem Verbund hin. Bestätigt wird dies durch die Ergebnisse der Durchstoßprüfung, wo die Verbunde bei dem Auslösen der Rovings einen vergleichbaren Kurvenverlauf zeigen.

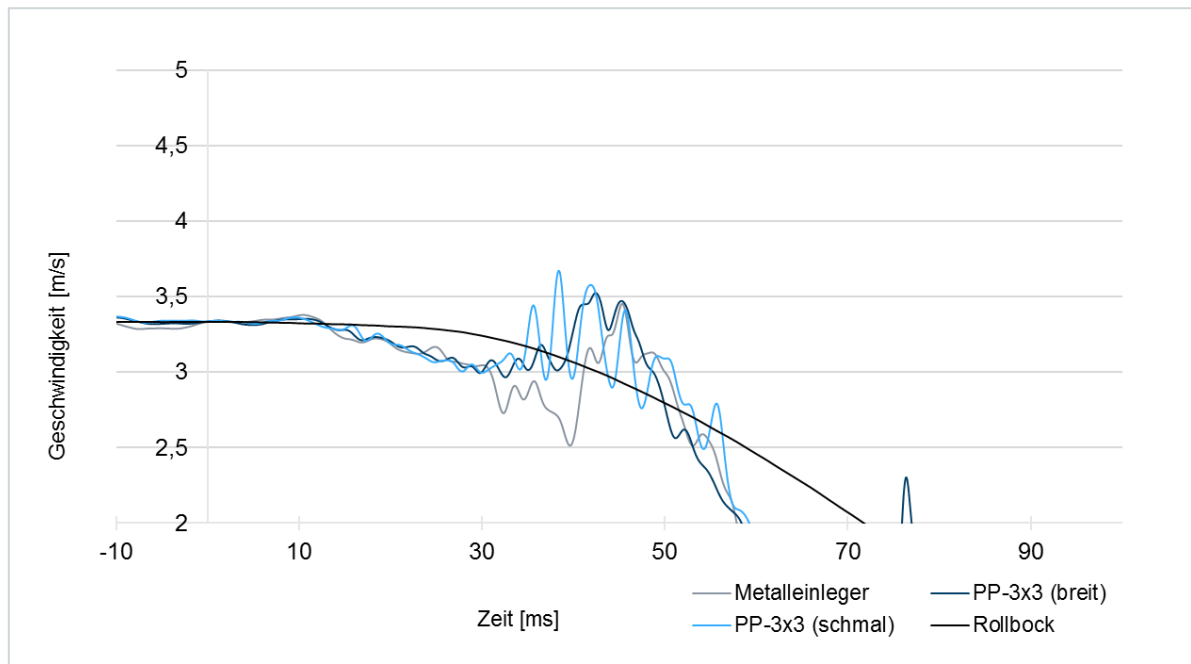


Abb. 119: Detailvergrößerung der Geschwindigkeitsänderung beim Frontaufprall am KUM mit PP-3x3 (breit und schmal)

Beurteilung des Crashverhaltens

Das Crashverhalten der Kunststoffmontageträger unterscheidet sich in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussgrößen. Sowohl die Geometrie und Größe der Gittereinleger als auch der Gitteraufbau und die Aufmachung sind maßgeblich für die Performance unter dynamischer Beanspruchung. Dabei bestätigen sich die Aussagen und Tendenzen der Plattenversuche innerhalb der Crashversuche.

➤ PP-3x3

Unter dynamischer Belastung weisen die KUM mit Einleger aus PP-3x3 das beste Crashverhalten über den gesamten Messzeitraum auf. Gründe hierfür liegen sowohl in dem erhöhten Faseranteil, wodurch die mechanischen Eigenschaften im Einlegerbereich verbessert werden, als auch in der guten Faser-Matrix Interaktion, wie sie bereits zuvor in den Kapiteln 5.1.2, 5.2.4 und 5.4.3. nachgewiesen wurde. Über die Haftung wird dynamisch eingetragene Energie von dem Verbund aufgenommen und innerhalb des Verbunds übertragen. Versagt die Grenzfläche, so wird die Aufprallenergie in das Auslösen der Fasern aus dem Verbund umgesetzt. Dies ist sowohl im sinusartigen Kurvenverlauf des Durchstoßversuchs als auch des Crashversuchs zu beobachten. Tendenziell zeigt der schmale PP-3x3 Einleger eine bessere Performance als der breite. Es besteht die Möglichkeit, dass die breiten Einleger eine Rissbildung über Kerbwirkung im vorderen Bereich des Seitengurts fördern und somit zu einem kompletten Versagen des Seitengurts führen. Das Abbremsverhalten bleibt in dem Intervall bis 30 ms bei beiden Einlegervarianten des PP-3x3 konstant oder liegt teilweise unterhalb der Referenzkurve mit Metalleinleger. Der

darauffolgende Kurvenverlauf und die Endgeschwindigkeit zeigen, dass der KUM mit Metalleinleger stärker Geschwindigkeit abbaut, als der FVK-KUM.

➤ **PP-6x6**

Für das PP-6x6 Gewebe zeigt der KUM mit breitem Einleger keine Reduzierung der Geschwindigkeit beim Auftreffen. Die Langlochverschiebung tritt plötzlich ein und geht direkt in ein Versagen am Anschraubpunkt über, sodass die Sensoren kein nennenswertes Abbremsverhalten zeigen. Vergleicht man die Messkurven der breiten und schmalen PP-6x6 Einleger untereinander, ist zu erwarten, dass ein Materialfehler bzw. ein Fehler bei dem Zusammenbau vorlag, der zu einer verzögerten und plötzlichen Langlochverschiebung mit Materialversagen führte. Somit wird der Versuch mit der Variante PP-6x6 breit nicht bewertet. Der schmale Einleger des PP-6x6 zeigt in dem Intervall bis ca. 120 ms ein ähnliches Abbremsverhalten, wie der Serien KUM. Erst nach besagtem Intervall ist eine abermalige Beschleunigung zu erkennen, die kennzeichnet, dass der Beschleunigungssensor nicht mehr in seiner ursprünglichen Position vorhanden ist. Die Detailbetrachtung der Signalübertragungszeit bis 30 ms zeigt einen vergleichbaren Geschwindigkeitsabbau wie der KUM mit Metalleinleger. Bei den angenommenen Versuchsbedingungen erfolgt demnach eine Signalübertragung zum Airbag.

➤ **SBR-5x5**

Das Gewebe mit SBR-Infusion zeigt ein anderes Versagensverhalten. Es versagt abrupt und verfälscht mit der plötzlichen positiven Beschleunigung das Signal des Beschleunigungssensors. Das plötzliche Versagen ist auf die geringe Grenzflächeninteraktion zwischen Roving und SG-Matrix zurückzuführen, wodurch ein sofortiger Auszug der Fasern aus dem Verbund stattfindet. Dadurch erfolgt lediglich eine kurzfristige negative Beschleunigung gepaart mit einer mäßigen Reduktion der Bewegungsenergie des ZSB. Das beschriebene Verhalten erfolgt innerhalb der ersten 120 ms, wodurch eine einwandfreie Signalübertragung an den Airbag bei Crashszenarien des Euro NCAP in Frage gestellt werden muss. Bezogen auf die getroffenen Versuchsannahmen in dieser Abhandlung erfolgt auch bei dem KUM mit SBR-5x5 Einleger eine Signalübertragung an den Airbag.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das PP-3x3 Gewebe in der schmalen Einlegervariante die beste Crashperformance im Vergleich zu der Serie zeigt. Demzufolge werden die weiteren Bauteilprüfungen mit dieser Verstärkung durchgeführt. In Bezug auf das Hintergrundrauschen und die kleineren Schwankungen innerhalb der Kurvenverläufe, ist zu erwarten, dass es sich um Messschwankungen handelt. Die Auflösung der Beschleunigungssensoren ist so genau, dass sie bspw. Unebenheiten der Rollbahn detektiert. Die durchgeführten Versuche zeigen unter

den angenommenen Bedingungen für vier von fünf Anwendungsfällen ein vergleichbares Abbremsverhalten, wie die Serie mit Metalleinleger. Um eine Aussage zu anderen Versuchsszenarien mit unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten und Überdeckungen zu treffen, müssen weitere Versuche nach Vorschrift der Euro NCAP durchgeführt werden. Folglich muss für diese Szenarien eine Abänderung der Basisfasern und/oder eine Änderung des Gittergewebeaufbaus bspw. durch Verstärkungspfade in Betracht gezogen werden.

5.6.2 Fanghakenkräfte

Die Messung der Fanghakenkräfte gliedert sich in einen statischen und einen dynamischen Teil. Bei dem statischen Teil des Fanghakenversuchs wird die Verformung unter Zugbeanspruchung sowie die bleibende Verformung nach Entlastung aufgezeichnet. Als Übersicht zeigt Abb. 120 den prozentualen Anteil der bleibenden Verformung an der Gesamtverformung für MP 1 (vgl. Abb. 57). Die Messwerte werden für den FVK-KUM über alle drei Temperaturen ermittelt. Als Referenz dient ein unverstärkter KUM, der bei 85°C getestet wird. In der Abb. 120 ist auf der Abszisse die Kraft und auf der Ordinate der prozentuale Anteil der bleibenden Verformung dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass sich der prozentuale Anteil der bleibenden Verformung linear mit dem steigenden Krafteintrag erhöht. Dabei wird deutlich, dass bei erhöhten Temperaturen (85°C) und maximalem Lasteintrag die bleibende Verformung im KUM ohne Einleger (Referenz) bei >35 % liegt. Dies ist auf das Erweichen des Kunststoffes zurückzuführen. Im Vergleich dazu zeigt der FVK-KUM eine bleibende Verformung bei 2200 N von ca. 25 %, was eine versteifende Wirkung des Gittergewebes bestätigt. Die maximal bleibenden Verformungen bei RT und -30°C liegen mit ca. 20 % (RT) und 15 % (-30°C) unterhalb der Werte bei erhöhten Temperaturen. Zusätzlich fällt bei RT und 85°C auf, dass die erste bleibende Verformung nach dem ersten Krafteintrag von 200 N verhältnismäßig groß gegenüber dem weiteren Anstieg der bleibenden Verformungen ist. Dies deutet im ersten Schritt auf eine Streckung der Polymerketten hin. Liegen diese gestreckt vor, ist eine Dehnung bzw. Verschiebung der Ketten gegeneinander nur noch geringfügig möglich. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Verformungen bei 200 N und 85°C mit und ohne Einleger identisch sind. Demnach ist zu erwarten, dass die Verstärkungswirkung des Gitters erst ab einer erhöhten Belastung (≥ 200 N) eintritt. Wird die Belastung weiter erhöht, verstärkt sich auch die Wirkung des Gittereinlegers. Der Grund hierfür liegt in dem Krafteinleitungspunkt, der sich im Obergurt am Haubenschloss befindet. Ist die eingetragene Kraft gering, reicht die Steifigkeit des verrippten Obergurts aus, der Verformung entgegenzuwirken, sodass die Seitengurte nicht belastet werden.

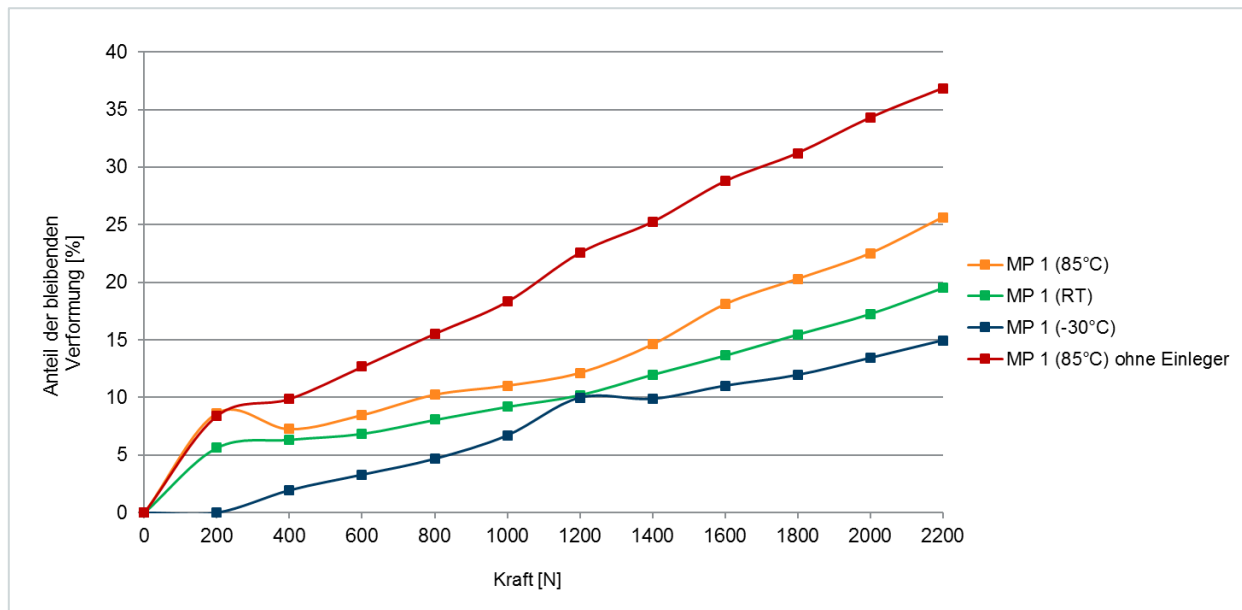


Abb. 120: Fanghakenkräfte statisch bestimmt für MP 1 bei -30°C, RT, 85°C;
Prozentualer Anteil der bleibenden Verformung an der Gesamtverformung
für FVK-KUM und Referenz ohne Einleger

In Abb. 121 sind die prozentualen Anteile der bleibenden Verformung an der Gesamtverformung für die Messpunkte 6 und 7 (vgl. Abb. 57) bei 85°C dargestellt. Diese Messpunkte sind relevant, weil sie direkt am oberen Punkt des verstärkten Seitengurts ansetzen. Neben dem FVK-KUM ist auch hier eine Referenzmessung eines KUM ohne jegliche Verstärkung aufgeführt. Allgemein ist festzuhalten, dass die gemessenen Werte und somit der Anteil der bleibenden Verformung an den Messpunkten 6 und 7 geringer sind als an MP 1. Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Entfernungen zum Krafteinleitungspunkt begründen. Weiterhin ist auch hier ein weitestgehend linearer Anstieg der bleibenden Verformung zu erkennen. Es fällt jedoch auf, dass sich die Messergebnisse bei Kräften von 600 und 800 N nur geringfügig unterscheiden. Erst ab ca. 1200 N ist eine erwartungsgemäße Divergenz zwischen Referenzwerten ohne Einleger und Werten des FVK-KUM zu sehen. Dies bestätigt die Messwerte von MP 1 und unterstreicht die Aussage, dass die Verstärkungswirkung des Gitters erst ab einer erhöhten Belastung eintritt. Die maximal bleibende Verformung der Referenz liegt für MP 6 bei ca. 27 % und für MP 7 bei ca. 30 %. Im Vergleich dazu zeigen die Werte des FVK-KUM geringere Restverformungen von ~21 % (MP 6) und ~18 % (MP 7). Die Differenz zwischen MP 6 und 7 ist auf die einseitige Faserverstärkung zurückzuführen, welche sich auf der Seite von MP 7 befindet.

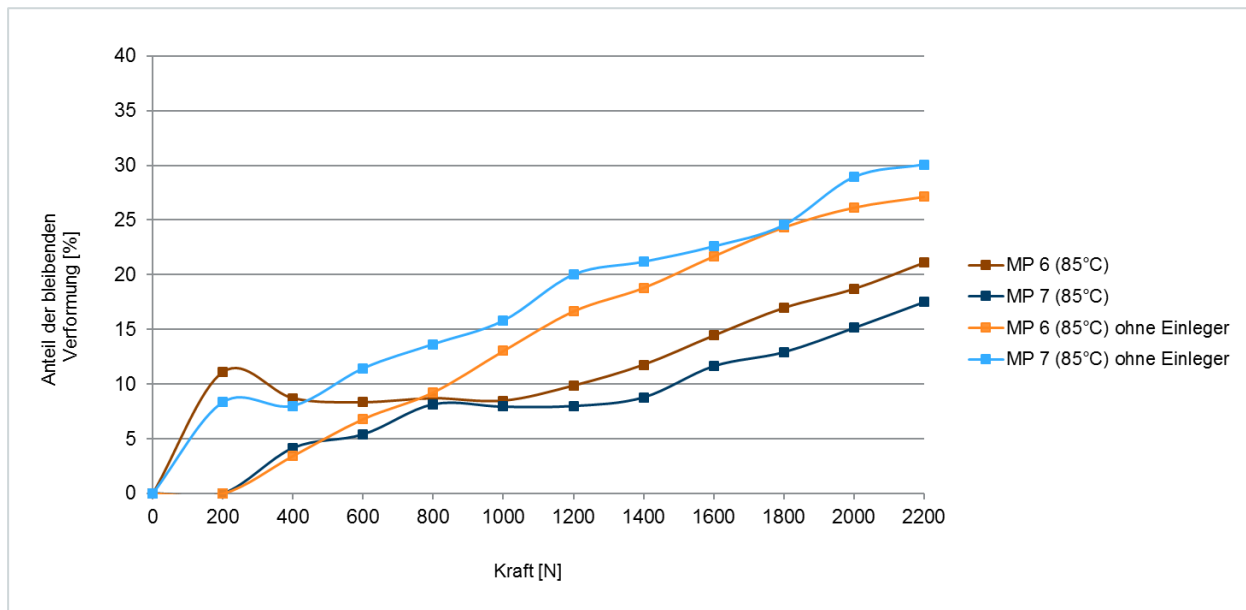


Abb. 121: Fanghakenkräfte statisch bestimmt für MP 6 und MP 7 bei 85°C;
Prozentualer Anteil der bleibenden Verformung an der Gesamtverformung
für FVK-KUM und Referenz ohne Einleger

Der dynamische Beanspruchungsverlauf des Versuchs wird nach dem Last-/Temperaturkollektiv in Abb. 57 durchgeführt. Die Soll-Werte aus Zug und Druck ergeben sich aus Erfahrungswerten für die Fahrzeugklasse des *Tiguans*. Nachstehende Abbildung (Abb. 122) zeigt exemplarisch die Kurven der dynamischen Zyklusprüfung bei 85°C an einem FVK-KUM. Die Prüfung unterteilt sich in eine Zugprüfung und zwei Druckprüfungen. Auf der ersten Y-Achse ist die Kraft in kN aufgetragen. Die zweite Y-Achse zeigt den Weg in mm. Auf der X-Achse ist der Zeithorizont in Sekunden zu sehen, in der die Belastung stattfindet. Die horizontal verlaufende dunkelblaue Linie kennzeichnet das Prüfkraftsoll. Es ist zu erkennen, dass die Ist-Kraft (grüne Kurve) dem Prüfkraftsoll entspricht. Es sind demnach keine versuchsbedingten Einschränkungen, bspw. durch nicht Erreichen der Prüfkraft, zu erkennen. Es fällt auf, dass der aufgenommene Weg für MP 1 und 2 bei den Druckzyklen identisch ist. Nur bei dem Zugzyklus zeigt MP 2 einen höheren Wert als MP 1 an. Grund hierfür ist die asymmetrische Form und der Verbau des Schlosses. Die dynamischen Prüfzyklen bei unterschiedlichen Temperaturen werden als i.O. bewertet. Die bleibenden Verformungen zeigen nur einen marginalen Unterschied zwischen dem Serien- und dem FVK-KUM.

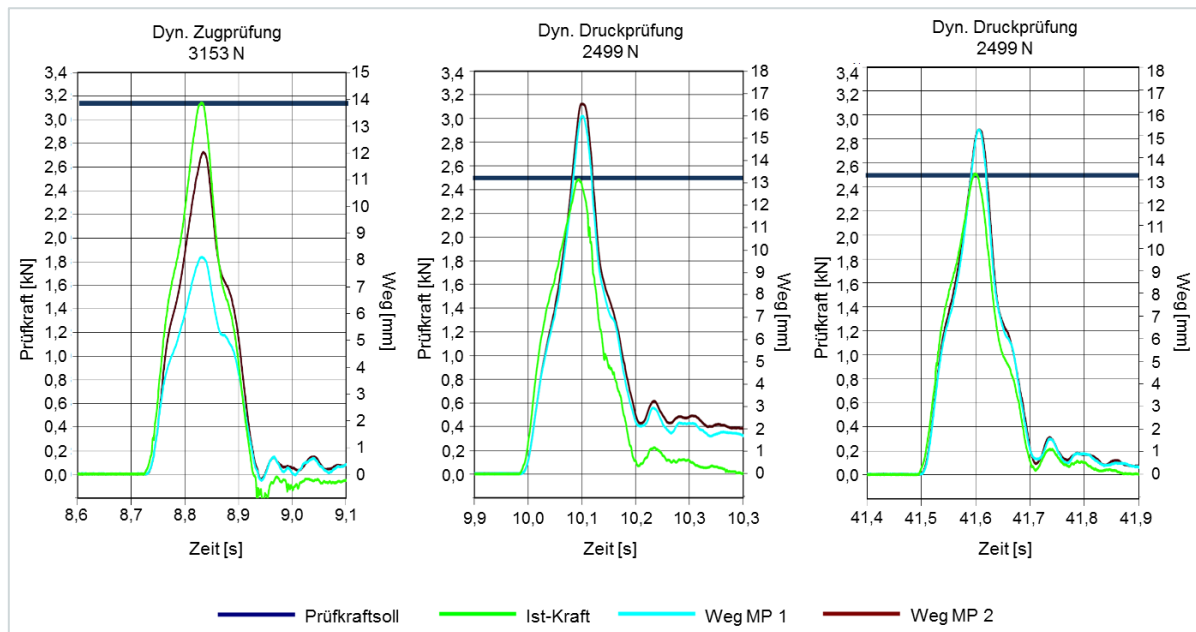


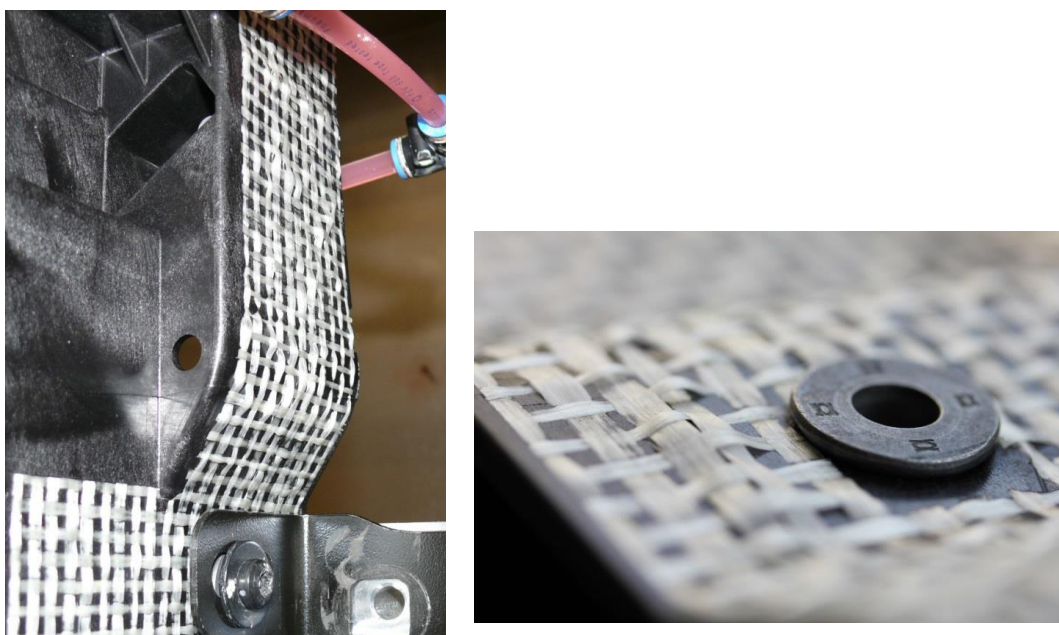
Abb. 122: Fanghakenkräfte dynamisch bestimmt an einem FVK-KUM für MP 1 und MP 2 bei 85°C

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl die statischen als auch die dynamischen Messungen als i.O. zu bewerten sind und die KUM die Anforderungen der Serie erfüllen. Die Messwerte der statischen Messung zeigen, dass die Gitterverstärkung die bleibende Verformung aktiv beeinflusst. Dabei stellt sich heraus, dass die Gittereinleger erst bei steigender Belastung einen Verstärkungseffekt erzielen, was für den Anwendungsfall im Crash von Vorteil ist. Im Vergleich zu der Referenz ohne Einleger, kann die maximale bleibende Verformung durch die erhöhte Steifigkeit und das entsprechende Rückstellverhalten um ca. 10-12 % gesenkt werden. Die statischen Versuche werden für alle gemessenen Bauteile als i.O. bewertet. Als Kriterium gilt, dass die maximale elastische Verformung unter Zug bei 2200 N an MP 2 und 3 einen Wert von 10 mm nicht überschreitet. Der dynamische Teil der Prüfung weist lediglich marginale Unterschiede in der bleibenden Verformung zwischen verstärktem und unverstärktem KUM auf. Demnach sind aus diesem Teil der Prüfung keine Tendenzen auf die Verstärkungswirkung erkennbar. Dennoch werden die dynamischen Zyklen gesamtheitlich als i.O. bewertet, sodass die Messung der Fanghakenkräfte als bestanden gilt.

5.6.3 Dauer-Schwingversuch

Die Prüfung der Schwingfestigkeit nach PV 1712/AG-99-01 wird an zwei modifizierten FVK-KUM für das Fahrzeugprojekt *Tiguan* durchgeführt. Dabei entfällt der verstärkende Blecheinleger linksseitig und wird durch ein Verstärkungsgitter aus Glasfaser ersetzt. Allgemein zeigt sich, dass die FVK-KUM mit breitem PP-3x3 Einleger die Anforderungen der PV in Bezug auf die Schwingbelastbarkeit bestehen. Die Schwingprüfung erfolgte auf zwei unterschiedlichen Lastni-

veaus mit jeweils einem Kunststoffmontageträger. Die Belastungshöhen entsprechen der nach interner Berechnungsvorschrift ermittelten Mindestwöhlerlinie. Die Prüffrequenz zwischen 9,9-11,6 Hz liegt weit unterhalb der Anregungsfrequenz für Schweißvorgänge (> 20 kHz), sodass ein Schmelzvorgang des Materials durch die Anregung ausgeschlossen werden kann. Die Umgebungstemperatur der Prüfung beträgt $100 \pm 2^\circ\text{C}$ und liegt innerhalb der Literaturangabe für den Daueranwendungsbereich [39] [73]. Es sind demnach keine Materialschädigungen zu erwarten. Des Weiteren befinden sich auch die Vicat-Erweichungstemperatur und die Formbeständigkeitstemperatur der SG-Matrix oberhalb der Prüftemperatur [73]. Die PP-Infusion zeigt anhand der ermittelten TGA-Ergebnisse aus Kapitel 5.2.1 bei 100°C ebenfalls keinen Materialabbau, sodass keine Verschlechterung der Materialeigenschaften zu erwarten sind. Nach den Prüfungen sind Anrisse am oberen Anschraubpunkt an dem Querträger rechtsseitig festzustellen, wobei ein Anriss bei dem 2. Prüfteil bereits vor der Prüfung zu erkennen war. Diese Anrisse können auf den manuellen Nietvorgang zurückgeführt werden. Sitzt der Niet nicht senkrecht zum Bauteil, können durch den maschinellen Quetschvorgang der Nieten Beschädigungen am Kunststoff entstehen. Nach ca. 24 Stunden Prüfungszeit sind partielle Ablösungen des Glasfasergitters vom Kunststoffmontageträger zu beobachten, die sich jedoch nicht ausweiten (Abb. 123). Auf Grund der ungleichmäßigen Rovingbreiten (Prototypenstand Gittergewebe) sind einige Gewebebereiche ungenügend in die SG-Matrix eingebettet. Hier sind die auftretenden Grenzflächen zwischen Roving und SG-Matrix gering, sodass unter zyklischer Belastung eine Ablösung der Teilbereiche erfolgt.



*Abb. 123: Ablösung des PP-3x3 Gittergewebes beim Dauerschwingversuch;
Übersicht (links) und Detail am oberen Anschraubpunkt (rechts)*

5.6.4 Klimawechseltest

Der Klimawechseltest ist nach der PV 2005 durchzuführen. Er beinhaltet wechselnde Heiz- und Kühlzyklen in einer Range von -35°C bis $+80^{\circ}\text{C}$, die über eine Dauer von ca. 12 Stunden durchfahren werden. Die optische Betrachtung der Kunststoffoberfläche zeigt keinerlei farbliche Veränderungen oder Rissbildungen. Ebenfalls ist eine Verbaufähigkeit nach Prüfende gegeben. In dem faserverstärkten Bauteilbereich sind partielle Aufwölbung des Gittereinlegers zu beobachten, wie sie bereits im Dauer-Schwingversuch (Kapitel 5.6.3) aufgetreten sind. Es fällt auf, dass sich vornehmlich die Schussfäden aufwölben und sich an den Kreuzungspunkten mit den Kettfäden lösen (Abb. 124). Die herstellungsbedingte Verklebung/Verschweißung der Kreuzungspunkte ist somit nicht stabil. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glasfaser und Polypropylen, wie sie auch schon in Kapitel 5.4.3 (Schlagzähigkeit) diskutiert werden. Während der Temperaturänderung findet eine unterschiedliche Ausdehnung der Matrix und der Glasfasern innerhalb der Rovings statt. Die Matrix dehnt sich bei Temperaturerhöhung wesentlich stärker aus und zieht sich bei Temperaturabfall wesentlich stärker zusammen, als die Glasfasern der Rovings. Dadurch werden Teilbereiche, die keine direkte Matrixanbindung haben (Kreuzungspunkte) aufgewölbt. Die Tatsache, dass sich vornehmlich die Schussfäden aufwölben, ist auf die unterschiedliche Streckung der Kett- und Schussfäden während des Herstellungsprozesses zurückzuführen. Im Webprozess unterliegen die Kettfäden einer höheren Streckung, als die Schussfäden, sodass bei letzteren eine größere Möglichkeit der Relaxation und Wölbung besteht.

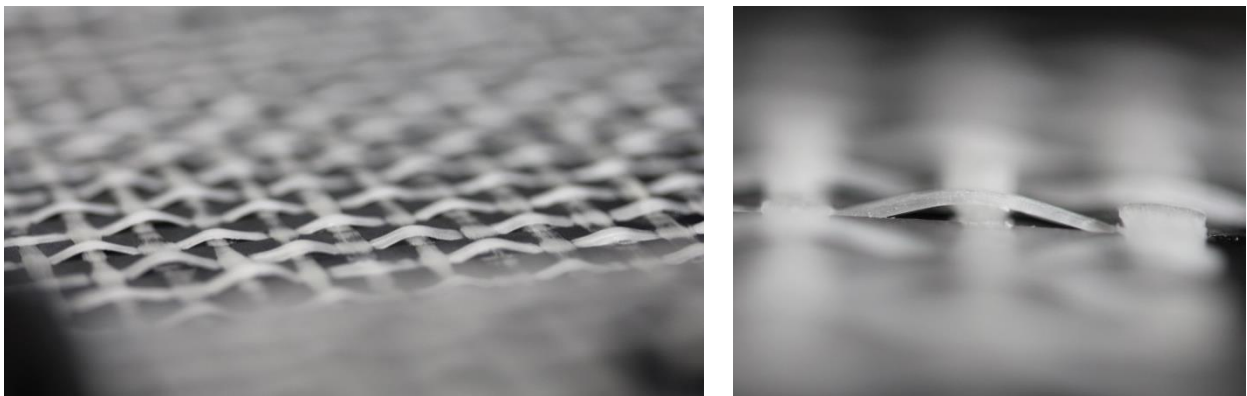


Abb. 124: Ablösung des PP-3x3 Gittergewebes in der Klimakammer; Übersicht (links) und Detail (rechts)

5.7 Beurteilung der Gewichts- und Kostenersparnis

Die folgende Betrachtung vergleicht die Gewichts- und Kostenersparnis zwischen dem Serienstand und den drei Varianten des gittergewebeverstärkten KUM. Die Betrachtung erfolgt auf Basis der Materialpreise und der Gewichtsveränderung im Bauteil und ist in relativen Zahlen (prozentuale Veränderungen) angegeben. Die infundierten Gewebe PP-3x3 und PP-6x6 befinden sich hinsichtlich Herstellung und Qualität noch im Prototypenstadium, sodass die entsprechenden Materialpreise nur als Richtpreis bewertet werden können. Es wird davon ausgegangen, dass die Positionierung und Anspritzung der Gittergewebe ohne nennenswerten Aufwand in den aktuellen SG-Prozess integriert werden kann. In dem Prozess platziert ein Roboter die Metallinsets für Schraubgewinde in der Kavität. Durch einen sinnvoll getakteten Prozess und einen Komplex-Greifer ist auch die Positionierung der Gewebeverstärkung im Werkzeug durch den Roboter denkbar. Die Lieferform der Gewebe kann als Rollenware mit Perforation erfolgen. Hier kann der Handlingsroboter durch eine definierte Abzugsbewegung den Einleger abrollen und über eine Schneidkante abtrennen. Der nachgestellte manuelle Nietprozess der Metallverstärkungen entfällt. In der folgenden Tabelle (Tab. 35) sind die Materialpreise und Gewichte des KUM in unterschiedlichen Konfigurationen aufgelistet. Die Werte für Preis und Gewicht sind jeweils in % dargestellt. Als Basis für Preis und Gewicht gilt mit 100 % das reine Spritzgussbauteil, welches jedoch ohne Verstärkungen den Serienanforderungen nicht genügt. Die Metallverstärkung erhöht das Gewicht gegenüber dem reinen Spritzgussbauteil um etwa 10 %. Der Preis steigt um ca. 33 %. Im Vergleich dazu zeigen die faserverstärkten KUM marginale Gewichtserhöhungen zwischen 0,3 und 0,5 %. Der Preisanstieg ist indes deutlicher gegenüber dem reinen Spritzgussbauteil und liegt zwischen 3 und 7 %.

Tab. 35: Kosten- und Gewichtsvergleich eines KUM in unterschiedlichen Konfigurationen

Konfiguration	Gewicht [%]	Preis [%]
KUM Spritzteil (ohne Verstärkung)	100	100
Metallverstärkung	110,6	133
SBR-5x5	100,4	107
PP-3x3	100,5	104
PP-6x6	100,3	103

In dieser Kalkulation ist die Lieferform des Gewebes samt Perforation nicht berücksichtigt. Ebenfalls sind die Preise der Gewebe noch nicht für die Abnahmemengen einer Serienanwendung verhandelt. Hinzu kommt, dass die eingesetzte Menge an Matrixmaterial pro Bauteil im Bereich der Verstärkung um ca. 2-5 % sinkt. Neben dem Preisvorteil auf Materialebene entsteht

durch das niedrigere Gewicht ein weiterer positiver Effekt. Die Gewichtseinsparung pro Fahrzeug leistet einen Beitrag zur Senkung des CO₂-Austoßes, der bei einem angenommenen Fahrzeugabsatzvolumen von 300.000 Einheiten pro Jahr und einer durchschnittlichen jährlichen Laufleistung von 15.000 km nicht unerheblich ist. Zusätzlich sinkt mit dem Einsatz des One-Shot Verfahrens die Belastung für den Mitarbeiter, da manuelle Prozesse entfallen.

6 Ganzheitliche Gegenüberstellung der Ergebnisse

In der nachfolgenden ganzheitlichen Gegenüberstellung werden Verknüpfungen und übergeordnete Zusammenhänge der Ergebnisse aufgezeigt und erläutert. Darüber hinaus wird der verfolgte Ansatz der Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen eindimensionaler Musterplatte und dreidimensionalem Bauteil überprüft und hinterfragt. Abschließend werden in diesem Zusammenhang die Fragestellungen aus Kapitel 1.2 diskutiert und notwendige weiterführende Aufgaben für Kapitel 7 definiert. Die Fragestellungen lauteten wie folgt:

- Besteht eine Notwendigkeit eines Polymerüberzugs/Infusion von Gittergeweben als Spritzgussverstärkung? Welchen Einfluss hätte diese auf die Stabilität des Halbzeugs im Spritzgussprozess und die Grenzflächeninteraktion im Verbund?
- Wie ist die Verstärkungswirkung von Gittergeweben auf die Verbundeigenschaften in Abhängigkeit des Fasergehalts?
- Was für Möglichkeiten und Grenzen gibt es, ein Gittergewebe in den Spritzgussprozess zu integrieren?
- Ist es möglich, durch einen zielgerichteten minimalen Fasereinsatz und eine optimale Verarbeitung einen ausreichenden Verstärkungserfolg zu erzielen?

Für die Charakterisierung und Einordnung der Verstärkungsfasern dient die Materialselektion und Eigenschaftscharakterisierung, die sowohl optische als auch mechanische und physikalische Aspekte berücksichtigen. In Abb. 125 ist der Wirkungsgrad der Schlichte, bezogen auf den Schlichtegehalt, für die Einzelfasern Glas 1 und 2 sowie Carbon 1 und 2 dargestellt. Der Wirkungsgrad definiert sich über die aufzubringende Auszugkraft in Abhängigkeit des prozentualen Schlichtebestandteils der Faser. Ein hoher Wert bedeutet demnach, dass eine gute Haftung bei geringem Schlichteauftrag vorliegt. Es ist zu erkennen, dass Glas 2 und Carbon 1 mit thermoplastgeeigneter Schlichte die besten Wirkungsgrade erzielen, wobei der Wert von Glas 2 ca. 30 % höher ist, als für Carbonfaser 1. Dies lässt sich anhand der REM-Bilder nach Faserauszug bestätigen, die Anhaftungen von der Matrix an Glas 2 zeigen. Gleichmaßen deutet das Schliffbild der Musterplatten auf eine Materialvermischung zwischen Matrix und Roving des Gittergewebes hin, was Zeichen für eine hervorragende Anbindung ist. Die Pull-Out Versuche an Filament und Roving sowie die Querkzugfestigkeit spiegeln eine ausgeprägte Faser-Matrix Interaktion ebenfalls wieder. Die Faser Glas 1 zeigt einen wesentlich geringeren Wirkungsgrad im Vergleich zu Glas 2, was über die Schliffbilder belegt ist. Anhand der Mikroskopaufnahmen ist eine deutliche Grenzfläche zu erkennen. Weitere Untersuchungen, wie Pull-Out und Querkzugfestig-

keit untermauern die These einer unzureichenden Haftung und somit einer nur mäßig geeigneten Schlichte. Der Wirkungsgrad von Carbonfaser 1 liegt in Bezug auf den Schlichtegehalt hoch. Die Eignung der Schlichte spiegelt sich auch in anderen Untersuchungen, wie der Querkzugfestigkeit und der Druckscherung wieder. Carbonfaser 2 besitzt hingegen bei dem höchsten Schlichtegehalt den niedrigsten Wirkungsgrad. Unabhängig von der Haftung besitzen die Carbonfasern hohe mechanische Kennwerte. Eine Anhaftung zur Oberfläche ohne geeignete Vorbehandlung/Schlichte stellt sich jedoch als ungenügend heraus. Im Gegensatz dazu zeigt die Jutefaser (nicht in der Abbildung, da keine Schlichte) eine passable Anbindung zu thermoplastischen Matrices. Diese ist auf ihre raue Oberflächenstruktur und die damit verbundene formschlüssige Anbindung zurückzuführen. In Bezug auf die erste These kann festgehalten werden, dass eine Polymerinfusion in Zusammenhang mit einer abgestimmten Faserschlichte essenziell für die Kraftübertragung zwischen Matrix und Faser ist. Die Ergebnisse der Eigenschaftsuntersuchungen im UD-Verbund bestätigen die bereits beschriebene gute Interaktion zwischen den Fasern mit thermoplastfreundlicher Schlichte und der Spritzgussmatrix. Das Verstärkungspotential der Fasern Glas 2 und Carbon 1 kann durch die Kraftübertragung entlang der Grenzflächen optimal genutzt werden. Ebenfalls ist ein Polymerüberzug/Infusion für die Stabilität im Spritzgussprozess notwendig. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass Faserbündel ohne Polymerüberzug/Infusion und ohne Klemmung im Werkzeug durch die Spritzgussmasse aufgefächert und auseinandergezogen werden. Die gezielte Verstärkungswirkung durch Faserausrichtung wird somit gemindert.

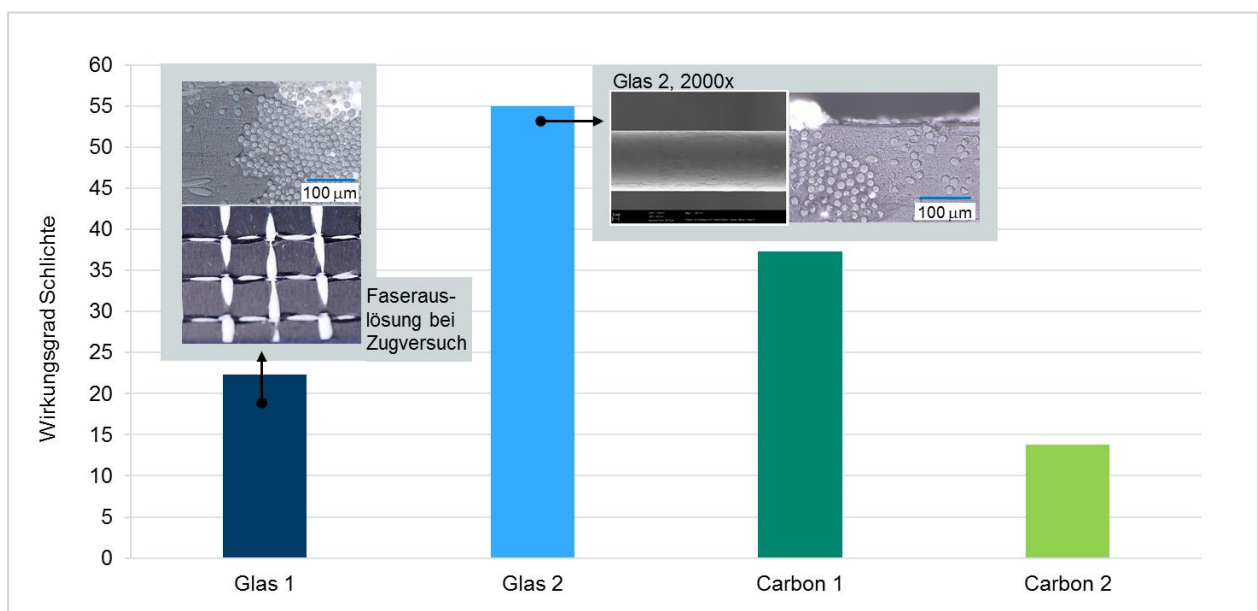


Abb. 125: Wirkungsgrad der Schlichte, ermittelt aus Auszugkraft bezogen auf den prozentualen Schlichtegehalt

Die Performance im Verbund sowie die gute Faser-Matrix Interaktion und die wirtschaftlichen Vorzüge begründen die Wahl der Glasfaser als Basis für den FVK. Vor dem Hintergrund, eine großserientaugliche Verstärkungsalternative für die Verarbeitung im SG-Prozess zu entwickeln, bietet sich eine offengliedrige Struktur an. Diese soll ohne vorgeschalteten Wärmeprozess verarbeitet werden und den hohen Verarbeitungsdrücken im Werkzeug standhalten. Die Bindungsarten werden demnach nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten des Webverfahrens (Leinwandbindung) und Verschiebefestigkeit des Endprodukts (Dreherbindung) ausgewählt.

Die Einstellungen des Verarbeitungsprozesses und die Optimierung der Parameter werden anhand der einzelnen Gewebe durchgeführt. Es zeigt sich eine Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte in Kettrichtung. Eine Materialdopplung stellt sich sowohl verarbeitungsseitig als auch in Bezug auf die mechanischen Kennwerte als nicht zielführend heraus. Die optimierte Verarbeitung der einlagigen Gewebe erfolgt bei hoher Schmelzetemperatur, geringer Werkzeugtemperatur und einer hohen Einspritzgeschwindigkeit. Eine zusätzliche Verstärkung über TFP zeigt eine sichtbare Kennwertsteigerung, die jedoch unter Betrachtung der Wirtschaftlichkeit bewertet werden muss.

Das PP-3x3 Gewebe wird von Beginn der Untersuchungen an favorisiert, da es den höchsten Faseranteil aufweist und auf Grund der Polymerinfusion eine gute Faser-Matrix Interaktion verspricht. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen der mechanischen Charakterisierung im 1D-Plattenverbund wieder. In Abb. 126 sind die spezifischen mechanischen Kennwerte, bezogen auf den jeweiligen Faseranteil für Matrix, SBR-5x5, PP-3x3 und PP-6x6 verstärkte Platten gegenübergestellt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Gewebeverstärkungen für eine Belastung auf Zug nicht geeignet sind. Bezogen auf den Faseranteil bewirken die Verstärkungen sogar eine Verringerung der Zugfestigkeit und des Zugmoduls, was zum einen auf die geringe Anzahl an Fasern in Zugrichtung und zum anderen auf die ungleichmäßige Krafteinleitung in die Fasern zurückzuführen ist. Bei einem Endlosfaseranteil zwischen 3,5 und 6 % und einer einseitigen Belastung wirken lediglich 1,7-3 % in Belastungsrichtung. Dies ist für eine Verstärkungswirkung zu gering. Weiterhin ist die einseitige Einbettung der Verstärkung unzureichend, da während der Prüfung ein ungleichmäßiges Belastungsprofil im Probekörper entsteht. Bei Biegebeanspruchung ist ein anderweitiges Verhalten zu erkennen. Die Biegefestigkeit liegt bei den PP-infundierten Verstärkungen auf Grund der Faser-Matrix Interaktion und der damit zusammenhängenden Kraftübertragung auf die Fasern oberhalb der Matrixkennwerte. Hingegen zeigt das SBR-5x5, bezogen auf den erhöhten Faseranteil keine nennenswerte Verbesserung der Biegefestigkeit. Der Biegemodul zeigt sich in Abhängigkeit zu dem Fasergehalt und weist bei PP-3x3 und SBR-5x5 eine faseranteilbezogene Steifigkeit oberhalb der Matrix auf. Die dynamischen und für den

Crashfall relevanten Kennwerte zeigen sowohl für die Schlagzähigkeit als auch für die Durchstoßfestigkeit Verbesserungen mit den Gewebeverstärkungen PP-3x3 und PP-6x6. Bspw. führt der Endlosfaseranteil von 6 % des PP-3x3 zu einer Erhöhung der faseranteilbezogenen dynamischen Kennwerte um 20 %. Neben der Ausschöpfung des Faserpotentials durch eine gute Grenzflächeninteraktion, sind diese Ergebnisse auf aktive Auszugsvorgänge der Rovings aus dem Verbund zurückzuführen. Vergleichsweise zeigt das SBR-5x5 in Bezug auf den erhöhten Faseranteil keine Verbesserung der Eigenschaften unter dynamischer Belastung.

Es kann festgehalten werden, dass eine vollständige Übertragung und Ausschöpfung des Faserpotentials von dem Filament in den Verbund nur bedingt möglich ist. Für quasistatische Belastungen auf Zug und Biegung sind nur geringfügige Kennwerterhöhungen zu verzeichnen, die jedoch für die Belastungen, die das Bauteil im eingebauten Zustand erfährt, ausreichend sind. Bei dynamischer Belastung sind deutliche Kennwertsteigerungen unter Schlag- und Stoßlast zu erkennen, die für den Crashfall von Vorteil sind. Bezogen auf die zweite These und mit Fokus auf die spätere Anwendung im Crashfall, kann somit eine ausreichende Verstärkungswirkung bestätigt werden.

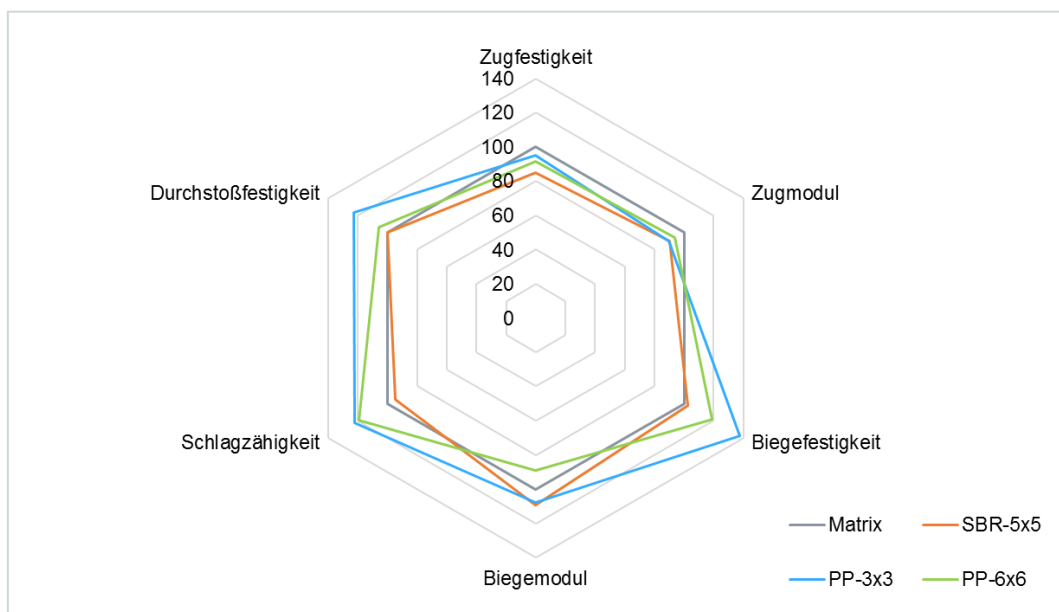


Abb. 126: Spezifische mechanische Kennwerte, bezogen auf den Faseranteil, normiert, für Matrix, SBR-5x5, PP-3x3, PP-6x6 verstärkte Platten

Für die Integration von textilen Verstärkungen in ein spritzgegossenes Bauteil muss der maximale Umform/Drapierradius ermittelt und die Übertragbarkeit der Prozessparameter auf das FVK-Produkt geprüft werden. Eine Implementierung der Gittergewebe in die aktuelle Seriengeometrie kann nach der ersten Musterung auf Grund von Handlings- und Positionierungsproblemen im Werkzeug ausgeschlossen werden. Für eine reproduzierbare Bauteilfertigung mit FVK-

Verstärkung ist eine Werkzeugänderung notwendig. Für die Nachbildung des Drapiervorgangs werden in einem Modell die Radien und Kanten der aktuellen Seriengeometrie des KUM in Form eines lasergesinterten Werkzeugstempels abgebildet. Über die Verschiebung der Kett- und Schussfäden während der Drapierung wird ein Grenzmuster erstellt und der maximal zu drapierende Radius festgelegt. Ebenfalls werden die kritischen Scherwinkel über Scherrahmenversuch und Drapetest definiert. Es ist festzustellen, dass die Dreherbindung eine höhere Verschiebefestigkeit aufweist und somit formstabiler ist, als das PP-infundiertes Leinwandgewebe. Ebenfalls neigt das Leinwandgewebe stärker zur Faltenbildung, als das Drehergewebe. Um einer Beschädigung des SG-Werkzeugs durch den Einleger vorzubeugen, werden die Gittergewebe in den Vorversuchen erwärmt und mit dem lasergesinterten Werkzeugstempel vorgeformt. Für die Implementierung in die Serie ist ein alternatives Schieberkonzept über Hydraulikschieber notwendig, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten und ein Preformen zu vermeiden. Die Positionierung des Einlegers erfolgt über einen gefederten Stift, der aus dem Versuchswerkzeug in die Serie adaptierbar ist. Das manuelle Handling muss durch ein geeignetes Greiferkonzept substituiert werden. Dabei ist die Handhabung des Gittergewebes als unkritisch zu betrachten, da es aufgrund der Polymerinfusion über eine ausreichende Eigensteifigkeit verfügt. Das Gittergewebe kann als Rollenware in geforderter Breite geliefert werden. Die Bestimmung des Längenmaßes ist bspw. über eine Art Perforation oder eine optisch sichtbare Markierung möglich, nach der das Textil über eine Schnittkante abgelängt und für den SG-Prozess bereitgestellt wird. Der Roboter greift sich den textilen Einleger und die Inserts, wartet bis das Werkzeug öffnet und bestückt die feste Werkzeugseite. Daraufhin schließt das Werkzeug und der Spritzgusszyklus startet. Nach Beendigung der Kühlzeit öffnet das Werkzeug wieder und entformt das Bauteil auf der beweglichen Seite, sodass der Roboter direkt an der beweglichen Werkzeugseite entnehmen kann. Ein entsprechendes Schema ist in Abb. 127 dargestellt.

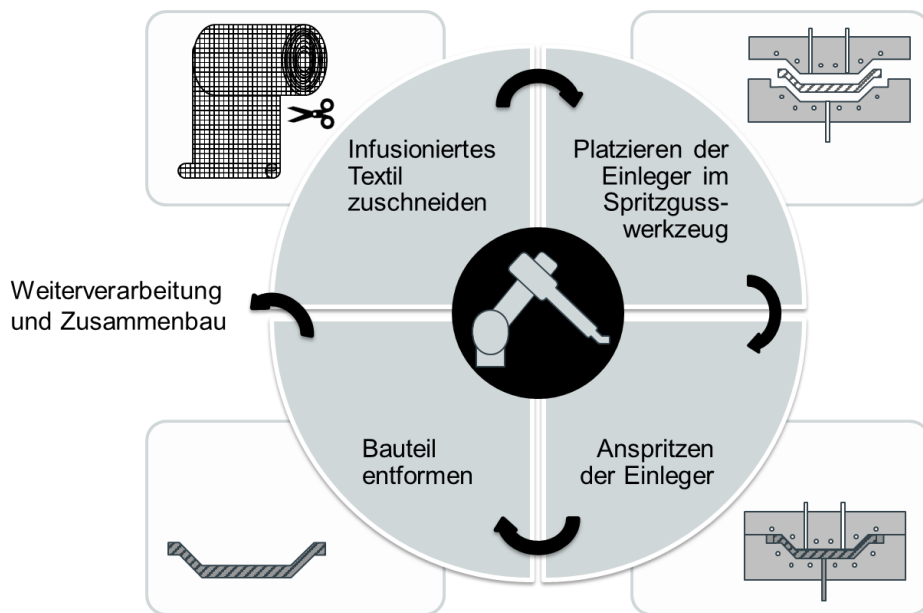


Abb. 127: Schematischer Prozessablauf der Herstellung von FVK-KUM, modifiziert [36]

In Bezug auf die dritte These kann festgehalten werden, dass die Integration von Gittergeweben im Spritzguss grundsätzlich abbildbar ist. In Abhängigkeit von der Wandstärke, können Einbett-hilfen in Form von Rippenstrukturen oder doppelten Verstärkungen eingebracht werden. Für die Anwendung im KUM ist es möglich die Bestückung und Verarbeitung der Gewebe nahezu zykluszeitneutral zu gewährleisten. Durch das Einbringen der Verstärkung während des Spritzgussprozesses entfällt die manuelle Nachmontage der Metalleinleger inklusive des Mitarbeiters. Die Implementierung hätte jedoch in der aktuellen Serienfertigung zur Folge, dass umfassende Änderungen im Werkzeug und im Greiferkonzept notwendig sind. Neben den Geometrieänderungen und dem Umbau der seitlichen Schrägsäulenschieber auf einen Hydraulikschieber (vgl. Kapitel 5.5.4), können zusätzlich aufgebrachte Rippen im Einlegerbereich die Positioniergenauigkeit fördern. Ebenso muss der Greifer neben den Inserts und den hergestellten Bauteilen die Einleger aufnehmen, transportieren und einhängen können. Der Verbau von FVK-KUM kann ohne Änderung erfolgen, da die neue Geometrie bauraumgerecht umkonstruiert ist. Die Performance der faserverstärkten KUM wird über die ausgewählten Bauteilprüfungen nachgewiesen. Sowohl die Fanghakenkräfte als auch der Dauerschwingversuch und der Klimawechseltest werden als i.O. bewertet. Die auftretenden Ablösungen des Gittergewebes können durch Optimierung der Gewebestruktur und eine verbesserte Einbettung minimiert werden. Eine Signalübertragung zum Airbag wird innerhalb der Crashversuche mit den angenommenen Parametern bei vier von fünf FVK-KUM nachgewiesen. Um eine Aussage zu anderen Versuchsszenarien mit unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten und Überdeckungen zu treffen, müssen weitere Versuche nach Vorschrift der Euro NCAP durchgeführt werden. Folglich muss für diese Szenarien eine Abän-

derung der Basisfasern und/oder eine Änderung des Gittergewebeaufbaus bspw. durch Verstärkungspfade in Betracht gezogen werden. Der FVK-KUM bietet in Bezug auf die durchgeführten Untersuchungen eine kostengünstige und leichtere Alternative zu dem Serien-KUM. Demnach kann die Hypothese bestätigt werden, dass bei ausreichender Qualifizierung des Faserverbundmaterials die Übertragbarkeit von 1D-Plattenebene über 2D-Drapierung auf 3D-Bauteilebene gewährleistet ist. Dennoch sind Grenzlastfälle und Freiprüfungen im Falle eines angestrebten Serieneinsatzes zu prüfen.

Die vierte und letzte These stellt die allgemeine Frage, ob es durch einen zielgerichteten minimalen Fasereinsatz und eine optimale Verarbeitung möglich ist, einen ausreichenden Verstärkungserfolg zu erzielen. Auch diese These kann anhand der vorliegenden Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Abhandlung bestätigt werden. Aus [61] und [102] ist zu entnehmen, dass der fertigungstechnisch relevante Faservolumenanteil zwischen 25-68 vol.% liegt, wobei die maximalen spezifischen Verbundeigenschaften zwischen 50-60 vol.% erreicht werden. Die aktuellen ganzheitlichen Verstärkungen in [28] und [103] besitzen einen durchschnittlichen Faservolumengehalt von ~50 vol.%. Die Versuche innerhalb dieser Abhandlung haben gezeigt, dass durch gezielte Materialselektion von Fasern bezogen auf deren Stärken und Schwächen, eine Erhöhung des Fasergehalts zwischen 3-6 wt.% (0,28-0,30 vol.%) ausreichend ist, um eine zufriedenstellende Performance zu erlangen. Dabei ist die systematische Vorgehensweise in der Entwicklungsstruktur auf jedes Bauteil mit definierten Belastungs- und Versagenskriterien anwendbar. Empfehlenswert sind gitterartige Verstärkungen für Bauteile, bei denen Grenzlastfälle in partiellen Bereichen abgefangen werden müssen. Ein Beispiel ist die Durchreiche einer Rücksitzbank, die bei einer Vollbremsung die beschleunigte Last eines ungesicherten Kofferrauminhalts tragen muss. Ein anderes Beispiel ist die Unterbodengruppe, welche den Unterbau des Automobils gegen Steinschläge und Unebenheiten im Gelände schützt.

Zusammenfassend lassen sich die Fragestellungen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wie folgt beantworten:

- Besteht eine Notwendigkeit eines Polymerüberzugs/Infusion von Gittergeweben als Spritzgussverstärkung? Welchen Einfluss hätte diese auf die Stabilität des Halbzeugs im Spritzgussprozess und die Grenzflächeninteraktion im Verbund?
- ➔ Ja, es besteht die Notwendigkeit eines Polymerüberzugs, da Voruntersuchungen mit Rohglasrovings gezeigt haben, dass durch die Viskosität der Spritzgussmasse die losen

Glasfilamente im Roving ausgeschwemmt werden. Ebenfalls ist die Haftung von Rohglas zu der unpolaren Spritzgussmasse gering. Der Einsatz von Glasfasern mit thermoplastgeeigneter Schlichte in Verbindung mit der PP-Infusion führt zu der notwendigen Stabilität des Halbzeugs während des Füllvorgangs bei hoher Massetemperatur und hoher Einspritzgeschwindigkeit. Weiterhin entsteht eine Materialvermischung zwischen PP-Infusion des Halbzeugs und Spritzgussmatrix, die durch Mikroskopaufnahmen sowie Auszugs- und Haftungsversuche nachgewiesen wird.

- Wie ist die Verstärkungswirkung von Gittergeweben auf die Verbundeigenschaften in Abhängigkeit des Fasergehalts?
- ➔ Die Verstärkungswirkung der Gittergewebe mit einem Fasergehalt von 3-6 wt.% fällt überraschend hoch aus. Besonders performant gestaltet sich der Verbund bei Biege-, Schlag- und Druckbeanspruchung. Dabei zeigen die Gittergewebe in dem vorliegenden Beispiel eine nur marginale Abhängigkeit der Kett-/Schuss-Ausrichtung innerhalb des Bauteils. Zusätzlich ist eine Erhöhung der Verbundeigenschaften über das Tailored Fibre Placement möglich.
- Was für Möglichkeiten und Grenzen gibt es, ein Gittergewebe in den Spritzgussprozess zu integrieren?
- ➔ Einlagige Gittergewebe können reproduzierbar in FVK-gerechte 1D-, 2D- und 3D-Geometrien integriert werden. Dabei ist eine genaue Positionierung der Gittergewebe im Werkzeug notwendig, welche verhindert, dass beim Schließen des Werkzeugs das Halbzeug beschädigt wird. Die beschriebene Stabilität sowie die Verschiebefestigkeit und Drapierbarkeit des Halbzeugs, lassen eine Spritzgussverarbeitung mit Serienparametern (hohe Massetemperatur, hohe Einspritzgeschwindigkeit, niedrige Werkzeugtemperatur) zu. Grenzen der Verarbeitung sind Konturversprünge und kleine Radien innerhalb des Einlegerbereichs und die reproduzierbare Verarbeitung von doppelten Gewebelagen.
- Ist es möglich, durch einen zielgerichteten minimalen Fasereinsatz und eine optimale Verarbeitung einen ausreichenden Verstärkungserfolg zu erzielen?
- ➔ Ja, es ist möglich mit einem minimalen Fasereinsatz und einer optimalen Verarbeitung einen ausreichenden Verstärkungserfolg für das vorliegende Beispielbauteil KUM zu erzielen.

7 Weiterführende Aufgaben

Für eine verlässliche und gleichbleibende Materialqualität der Einleger muss der Webprozess des infundierten PP-3x3 Gewebes optimiert werden. Dabei steht sowohl die Homogenität der Gitterabstände als auch die aufgefächerte Form der Kett- und Schussfäden im Vordergrund. Hierfür ist eine Weiterentwicklung des Spreiz- und Infusionsprozesses erforderlich. Es ist weiterhin von Interesse, ein Drehergewebe aus Glasfaser 2 mit PP-Infusion herzustellen, um die Vorteile der Verschiebefestigkeit für weitere Geometrien zu nutzen. Ebenfalls wäre es möglich die Gitterabstände innerhalb des Gewebes zu ändern, um gezielt verstärkende Bereiche mit einer höheren Anzahl an Fäden/cm² herzustellen. Dies kann eine Alternative zur TFP-Verstärkung darstellen. Dahingehend ist auch ein hybrides Gittergewebe aus unterschiedlichen Faserarten denkbar, in dem bspw. jeder dritte Kettfaden aus Carbonfaser besteht und damit die Gesamtperformance steigert.

Bezogen auf die Verarbeitung im SG-Prozess kann ein Matrixmaterial mit geringerem Kurzfasergehalt von Vorteil sein. Ein weniger gefülltes Material ist fließfähiger und kann die Gittereinleger besser durchströmen. Es ist jedoch zu bedenken, dass mit einem geringeren Kurzfasergehalt auch die mechanischen Eigenschaften des Materials sinken. Demnach ist das Einbringen von Additiven, welche die Fließfähigkeit bei vorhandenem Fasergehalt erhöhen eine mögliche Option. Durch zusätzlich aufgebrachte Rippen auf den Einlegerflächen kann das Gewebe tiefer in die Matrix eingebettet werden. Diese Art der Konstruktion hat sich bereits beim Einbetten von Airbagnetzen bewährt. Ebenfalls kann ein pulsierender Schmelzeeintrag in die Kavität eine Verbesserung der Durchströmung des Gewebes erzielen. In diesem Zusammenhang ist die Verlegung von den Anspritzpunkten zu überdenken. Die Anspritzpunkte können von dem Obergurt auf die Seitengurte verlegt werden, um im Prozess direkt auf die Einleger zu spritzen. So würde einer undefinierten Umströmung vorgebeugt werden. Dabei muss jedoch eine Füllung des Obergurts sichergestellt sein. Neben einer Verlagerung der vorhandenen Anspritzpunkte, ist auch das Einbringen zusätzlicher Anspritzpunkte denkbar. Die Entwicklung eines geeigneten Handlings ist ein weiteres offenes Handlungsfeld. Während die Kontur im KUM mit einem Hydraulikschieber abgeformt werden kann, ist für komplexere Geometrien ein Handling notwendig, das bspw. vorlegen und falten kann. Das Verhalten der Gittergewebe in anderen komplexen Geometrien muss ebenfalls erneut charakterisiert werden. Dabei muss die Auswahl der Prüfungen in Anbetracht der späteren Belastungsarten erfolgen.

Für die Umsetzung und Implementierung von faserverstärkten KUM in Serie sind zusätzlich zu den bereits durchgeführten Prüfungen weitere Erprobungen (Schöckl-Test, etc.) notwendig. Ei-

nen wesentlichen Bestandteil der Freiprüfungen bilden verschiedene Crashtests mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Aufprallwinkeln. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen bilden abweichende Anforderungen in Hinblick auf die Sensorrückmeldung, die ein FVK-KUM erfüllen muss. Der Gesamtfahrzeugcrash gilt dabei als maßgeblich für die gesetzliche Freigabe des Fahrzeugs und somit des eingebauten KUM. Weiterhin sind das Langzeitverhalten und unterschiedliche klimatische Bedingungen für den weltweiten Einsatz abzuprüfen.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende wissenschaftliche Abhandlung befasst sich mit der Entwicklung und Verarbeitung von gitterartigen Verstärkungen für Leichtbauanwendungen im Spritzgussverfahren. Für den Anwendungsfall gilt der Kunststoffmontageträger des aktuellen *Tiguan* als Zielbauteil. Die manuell montierte Metallverstärkung soll durch eine partielle Faserverbundvariante im Spritzguss substituiert werden. Die Grundlagenentwicklung erfolgt von der eindimensionalen Plattenebene, über die zweidimensionale Verformung, bis zum dreidimensionalen Bauteil. Dabei liegt jeweils ein besonderes Augenmerk auf der späteren Implementierung in die Großserie. Ausgewählte Komponentenversuche unter Berücksichtigung der Bauteilfreigabe lassen einen Abgleich zum derzeitigen Serienbauteil zu.

Die Basis der gitterartigen Gewebeverstärkung bilden zwei verschiedene Glasfasertypen, die in Vorversuchen bezüglich mechanischer Eigenschaften, Faser-Matrix Interaktion zu Polypropylen und Wirtschaftlichkeit die besten Ergebnisse erzielen. Dabei zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen thermoplast- und duroplastfreundlicher Schlichte der Fasern. Die daraus hergestellten Gittergewebe unterscheiden sich in der Bindungsart (Dreher- und Leinwandbindung), dem Gitterabstand (3x3, 5x5, 6x6 mm) und der Polymerinfusion (SBR, PP).

Die Verarbeitung der Gewebe auf eindimensionaler Ebene erfolgt im Spritzgussverfahren mittels einer einfachen Plattengeometrie. Als Matrix dient ein PP-GF30, wie es für das aktuelle Serienbauteil zum Einsatz kommt. Neben der Optimierung der Spritzgussparameter werden unterschiedliche Angusstypen, Gewebeausrichtungen und Materialdopplungen untersucht. Daraus resultiert, dass ein einlagiger Zuschnitt in Kettrichtung den höchsten Verstärkungseffekt erzielt. Der favorisierte Angusstyp ist ein Filmanguss, der zusätzlich die Ausrichtung der Kurzglasfasern in der Matrix unterstützt. Die mechanische Charakterisierung der Platten zeigt bei der PP-3x3 Variante Kennwerterhöhung gegenüber dem reinen Spritzgussmaterial von bis zu ~40 %. Die Randbedingungen der späteren Bauteilkontur werden über eine zweidimensionale Umformung ermittelt. Der maximale Umformradius der Gewebe und der zugehörige kritische Scherwinkel definieren die faserverbundgerechte Kontur des Verstärkungsbereichs im KUM.

Die verstärkten KUM werden hinsichtlich freigaberelevanter Bauteilprüfungen untersucht. Wesentlicher Bestandteil dabei ist ein Crashversuch, der in modifizierter Art durchgeführt wird. Da der Crashversuch unter den getroffenen Annahmen lediglich eine Tendenz darstellt, müssen weitere Versuche nach Euro NCAP durchgeführt werden, um eine Substitution der Metallverstärkungen durch gitterartige Glasfasergewebe für den Grenzlasterfall zu belegen. Zu den weiterführenden Aufgaben gehört die Durchführung eines Gesamtfahrzeugcrashs, um die Performance der

FVK-KUM in Zusammenspiel mit anderen Fahrzeugkomponenten zu prüfen. Weiterhin ist eine Optimierung der Materialqualität und die Entwicklung eines geeigneten Handlingkonzepts für die Serie umzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [1] Mediaplanet, „Mitten im Leichtbaudschungel,“ *Zukunft Leichtbau*, Nr. Juni 2016, p. 3, 2016.
- [2] Umweltbundesamt, „Emissionsstandards - Europäische Abgas- und CO₂-Gesetzgebung,“ Umweltbundesamt, 01 04 2015. [Online]. Available: www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards. [Zugriff am 02 12 2015].
- [3] O. Täger und A. Plath, *Fachtagung "Großserientaugliche thermoplastische Strukturen" - Bedeutung des Leichtbaus für die Automobilindustrie*, Chemnitz, 2013.
- [4] Volkswagen, „www.volkswagen.de,“ 03 2013. [Online]. Available: http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/Volkswagen/Nachhaltigkeit/service/download/XL1_2013/der-xl1---hintergrundbericht-pdf/_jcr_content/renditions/rendition.file/der-xl1---hintergrundbericht.pdf. [Zugriff am 01 03 2017].
- [5] H. E. Friedrich, *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, Wiesbaden: Springer Verlag, 2013.
- [6] J. Schöpfer, *Spritzgussbauteile aus kurzfaserverstärkten Kunststoffen: Methoden der Charakterisierung und Modellierung zur nichtlinearen Simulation von statischen und crashrelevanten Lastfällen*, Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Schriftreihe Band 97, 2012.
- [7] L. Kroll, *Spritzgießen für textilverstärkte Kunststoffbauteile - 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, Wiley-VCH, 2009.
- [8] B. Klein, *Leichtbaukonstruktion*, Springer Verlag, 1997.
- [9] J. Kunzmann, *Beitrag zur konstruktiven Strukturbeeinflussung faserverstärkter Thermoplaste*, Chemnitz, 2001.
- [10] E. Hufnagl, C. Cherif, G. Franzke, H. Erth, R. Helbig, W. Hufenbach, R. Böhm und R. Kupfer, „Thermoplastische endlosfaserverstärkte Spritzgussteile durch Einsatz textiler Gitter,“ April 2008. [Online]. Available: <https://www.kunststoffe.de/fachinformationen/zeitschrift-kunststofftechnik/artikel/thermoplastische-endlosfaserverstaerkte-spritzgussbauteile-durch-einsatz-textiler-gitter-548652.html>. [Zugriff am 08 07 2018].
- [11] PUK - Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, „Prüfprotokoll

-
- Kapillarrheometer,“ Clausthal, 2016.
- [12] J. Dings, „How clean are Europe’s cars? An analysis of carmaker progress towards EU CO2 targets in 2014,“ European Federation for Transport and Environment (T&E), 2015.
- [13] S. Dai, P. Cunningham, S. Marshall und C. Silva, „Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites,“ *Composites: Part A*, pp. 195-207, 18 11 2014.
- [14] B. Cox, M. Dadkhah, R. Inman, W. Morris und J. Zupon, „Mechanisms of compressive failure in 3D composites,“ *Acta Metall Mater*, pp. 3285-3298, 1992.
- [15] A. Mouritz und B. Cox, „A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites,“ *Composites: Part A*, pp. 709-728, 06 2010.
- [16] J. Baucom und M. Zikry, „Low-velocity impact damage progression in woven E-glass composites systems,“ *Composites: Part A*, pp. 658-664, 05 2005.
- [17] P. Wang, X. Legrand, P. Boisse, N. Hamila und D. Soulat, „Experimental and numerical analyses of manufacturing process of a composite square box part: Comparison between textile reinforcement forming and surface 3D weaving,“ *Composites: Part B*, pp. 26-34, 01 04 2015.
- [18] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé und F. Dumont, „Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffness,“ *Composites Science Technology*, pp. 683-692, 2011.
- [19] N. Zanjani, A. Sexton und S. Kalyanasundaram, „Induced forming modes in a pre-consolidated woven polypropylene composite during stretch forming process at room temperature: I. Experimental studies,“ *Composites: Part A*, pp. 251-263, 13 10 2014.
- [20] A. Zhamu, W. Zhong und J. Stone, „Experimental study on adhesion property of UHMWPE fiber/nano-epoxy by fiber bundle pull-out tests,“ *Composites Science and Technology*, pp. 2736-2742, 2006.
- [21] J. Tröltzsch, *Spritzgießtechnische Direktimprägnierung textiler Halbzeuge und Preformen bei komplexen Hochleistungsbauteilen*, Chemnitz, München: Dr. Hut Verlag, 2012.
- [22] C. Cherif, „Entwicklung einer Technologie zur Strukturfixierung textiler Halbzeuge mit Hybridgarnen für komplexe, beanspruchungsgerechte Preforms,“ ITM, Dresden, 2012.
- [23] E. Häntzsche, A. Nocke und C. Cherif, „Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton -

-
- Integrierte textilbasierte Sensorlösungen zur In-Situ-Strukturüberwachung adaptiver Gebäudehüllen,“ in *Tagungsband 18. GMA ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme*, Nürnberg, 2016, pp. 500-505.
- [24] Volkswagen, *Teiletisch XLI (CFK-Komponenten)*, Wolfsburg, 2014.
- [25] W. Klusmeier und V. Scharpenberg, „Jedes Gramm zählt,“ *Kunststoffe*, 03 2014.
- [26] M. Bitterlich, „Maßgeschneidert auf reaktives Polyamid 6,“ *Kunststoffe*, 03 2014.
- [27] J. Köbler, „www.audi.de,“ Audi, 01 2013. [Online]. Available: http://audihooldus.de/de/brand/de/vorsprung_durch_technik/content/2013/04/leicht-tut-gut.html. [Zugriff am 01 03 2017].
- [28] P. Egger, „Spritzgießtechnik steigert Effizienz in Faserverbundfertigung,“ *lightweightdesign*, 01 2014.
- [29] T. Wolff, S. Wulfers und J. Korzonnek, „Innovativ und umweltfreundlich - BMWi3,“ *Kunststoffe*, 03 2014.
- [30] C. Gaßel, „www.plasticker.de,“ 4 11 2013. [Online]. Available: <http://plasticker.de/news/showartikel.php?id=152&begriff=leichtbau&backto=/news/searchartikel.php>. [Zugriff am 02 03 2017].
- [31] B. Klein, „Nachhaltigkeit und Design,“ *Kunststoffe*, 03 2014.
- [32] „www.mercedes-benz-classic.com,“ Daimler, [Online]. Available: http://www.mercedes-benz-classic.com/content/classic/mpc/mpc_classic_website/de/mpc_home/mbc/home/history/amg/sls_amg_electric_drive.html. [Zugriff am 02 03 2016].
- [33] P. Königsreuther, „www.maschinenmarkt.de,“ 14 06 2016. [Online]. Available: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/kunststoffverarbeitung-mit-nase-vorn-effekt-a-538412/index3.html>. [Zugriff am 07 03 2017].
- [34] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Berlin: SpringerVerlag, 2007.
- [35] G. W. Ehrenstein, *Faserverbund-Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag, 2006.
- [36] D. Reiß, „Experimentelle Untersuchung von endlosfaserverstärkten Spritzgussbauteilen mittels strukturierter Gewebe anhand des Kunststoffmontageträgers,“ Wolfsburg, 2017.
- [37] F. Henning und E. Moeller, *Handbuch Leichtbau*, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [38] M. Flemming, G. Ziegmann und S. Roth, *Faserverbundbauweisen - Fasern und Matrices*,

-
- Heidelberg: Springer Verlag, 1995.
- [39] Baur, Brinkmann, Osswald und Schmachtenberg, *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, Hanser, 2013.
- [40] T. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth, *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*, Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [41] W. Michaeli und M. Wegener, *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*, München: Carl Hanser Verlag, 1989.
- [42] D. Hepp, „Hochpolymere Additive zur Verbesserung der Schlagzähigkeit von Thermoplasten aus,“ in *Taschenbuch der Kunststoff-Additive*, München, Carl Hanser Verlag, 1989, pp. 525-548.
- [43] M-Base Engineering + Software GmbH, „Material Data Center,“ [Online]. Available: <https://www.materialdatacenter.com/mb/>. [Zugriff am 09 09 2018].
- [44] Volkswagen, *Preiseinordnung Verstärkungsfasern*, Wolfsburg, 2016.
- [45] C. Cherif, *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*, Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
- [46] M. Flemming, G. Ziegmann und S. Roth, *Faserverbundbauweisen - Halbzeuge und Bauweisen*, Heidelberg: Springer, 1996.
- [47] H. Gruschwitz, *Möglichkeiten zur Gewichtsreduzierung am Fahrzeug-Frontend mit der Substitution eines Blecheinlegers durch endlosfaserverstärktes Polypropylen aus dem Spritzgussprozess*, Wolfsburg, 2016.
- [48] Lanxess - Bond Laminates, *TEPEX-Organobleche; Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungsfelder*, Wolfsburg, 2014.
- [49] M. Neitzel und P. Mitschang, *Handbuch Verbundwerkstoffe*, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [50] R. Teschner, *Glasfasern*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [51] BYK Additives & Instruments, „Anwendungsinformation TP-A 2: Modifikatoren für glasfaserverstärktes Polypropylen und Polyamid,“ [Online]. Available: https://www.byk.com/fileadmin/byk/additives/highlights/additives_for_thermoplastics/BYK_TP-A2_GlassFiberModifiers_DE_1_.pdf. [Zugriff am 14 07 2016].
- [52] M. Etheverry, M. Ferreira, N. Capiati und S. Barbosa, „Chemical anchorage of polypropylene onto glassfibers: Effect on adhesion and mechanical properties of their composites,“ *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Nr. 43, pp. 26-31, 2013.

-
- [53] T. Krumpholz, *Vorlesungsskript Faserverbundwerkstoffe*, Osnabrück, 2013.
- [54] K. Bittner, *Entwicklung einer konzeptionellen Vorgehensweise zur wirtschaftlichen Gestaltung von naturfaserverstärkten Polyurethanbauteilen - Vom Werkstoff bis zum Bauteil* -, Dissertation TU-Clausthal: Logos, 2015.
- [55] „maschinenbau-wissen.de,“ [Online]. Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/391-aufbau-spritzgiessmaschine>. [Zugriff am 12 06 2017].
- [56] C. Hopmann und W. Michaeli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [57] C. Linn, L. Hoffmann, T. Müller und D. Drummer, „Herstellung von CFK-Bauteilen durch Direktimprägnierung mit Thermoplasten in der Spritzgießmaschine,“ *lightweight design*, pp. 56-61, 2012.
- [58] H. Wörl und K.-H. Hoyer, *Abschlussseminar - Werkzeugtechnologien zur optimalen Imprägnierung von Textilien im Spritzgießprozess*, Chemnitz, 2011.
- [59] Volkswagen, „Interne Simulation Volkswagen, Abteilung HTE,“ 2014-2017. [Online].
- [60] New Media Publisher GmbH, „www.plasticker.de,“ [Online]. Available: http://plasticker.de/preise/preise_monat_single.php. [Zugriff am 05 04 2017].
- [61] M. Flemming und S. Roth, *Faserverbundbauweisen - Eigenschaften*, Berlin: Springer, 2003.
- [62] S. Pischinger und U. Seiffert, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [63] Insassenschutz - Airbags und Rückhaltesysteme, [Online]. Available: http://insassenschutz.50webs.com/5_2_airbags.html. [Zugriff am 01 04 2017].
- [64] J. Dyckhoff und H. G. Haldenwanger, *Entwicklung eines crashcompatiblen Faserverbundkunststoff-Trägers, Kunststoffe im Automobilbau – variabel für die Zukunft*, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1999.
- [65] A. Dehn, *Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation des Crashverhaltens gewebeverstärkter Thermoplaste unter Temperatureinfluss*, Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2001.
- [66] M. Holzapfel, G. Kopp, P. Adamski, H. Elsenhans, J. Christlein und T. Hambrecht, *Numerische Nachbildung der Crashfront von faserverstärkten Strukturen mit Hilfe von Mehrschalmodellen*, Frankenthal: LS-DYNA Anwenderforum, 2007.

-
- [67] M. Tarigopula, M. Langseth, O. S. Hopperstad und A. H. Clausen , „An experimental and numerical study of energy absorption in thin-walled high-strength steel sections,“ *WIT Transaction of Engineering Sciences*, p. Vol. 49, 2005.
- [68] Leco, *Datenblatt Jutegarn*, Emsdetten, 2016.
- [69] Owens Corning, *Datenblatt Glasfaser Cem-FIL*, 2016.
- [70] Johns Manville, *Datenblatt Glasfaser StarRov LFT 490*, 2013.
- [71] SGL Group, *Datenblatt Carbonfaser Sigrafil Continuous Carbon Fiber Tow*, 2016.
- [72] Teijin, *Datenblatt Carbonfaser Toho Tenax*, 2012.
- [73] Lyondell Basell, *Technisches Datenblatt Hostacom*, 2015.
- [74] C. Scheffler, J. Hiller, S. Preßler, M. Krüger und A. Rothe, „Ergebnisbericht - Charakterisierung der mechanischen und chemisch/physikalischen Eigenschaften verschiedener Verstärkungsfasern für den Einsatz in PP-Matrix,“ Dresden, 2017.
- [75] D. ISO1887, *Textilglas; Bestimmung des Glühverlustes*, Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [76] D. E. I. 3344, *Textile Glas(faser)produkte; Bestimmung des prozentuellen Feuchtigkeitsgehaltes*, Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [77] G. W. Ehrenstein und E. Bittmann, *Duroplaste - Aushärtung, Prüfung, Eigenschaften*, Wien: Carl Haner Verlag , 1997.
- [78] A. D1577, *Bestimmung des Titers von Textilfasern*, West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- [79] E. Mäder, *Grenzflächen, Grenzschichten und mechanische Eigenschaften faserverstärkter Polymerwerkstoffe - Habilitationsschrift*, Dresden, 2001.
- [80] Leibniz Institut für Polymerforschung Dresden, „www.ipfdd.de,“ [Online]. Available: <https://www.ipfdd.de/de/abteilungen-und-gruppen/institut-physikalische-chemie-und-physik-der-polymere/abteilungen/polymergrenzflaechen/methoden-ausstattung/kontaktwinkelmessungen/>. [Zugriff am 21 03 2017].
- [81] K. Schneider, B. Lauke und W. Beckert, „Compression Shear Test (CST) - A Convinient Apparatus for the Estimation of Apparent Shear Strength of Composite Materials,“ *Applied Composite Materials*, pp. 43-62, 2001.
- [82] J. Grellmann, *Kunststoffprüfung*, München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [83] D. E. I. 13934-1, *Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden*, Berlin: Beuth, 2013.
- [84] D. S. 8100, *Automatische Prüfung der Drapierbarkeit an Gelegen und Geweben für*

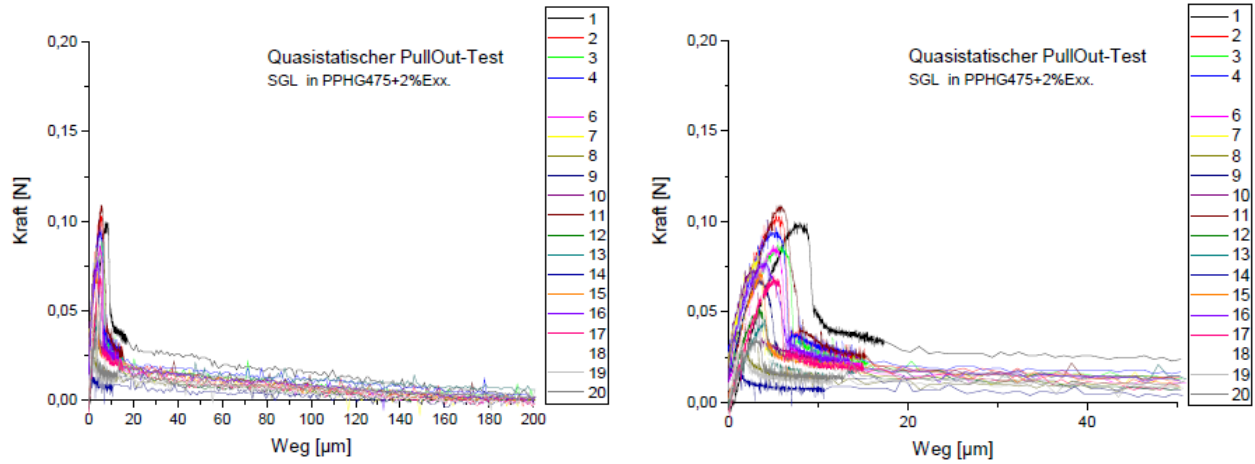
-
- endlosfaserverstärkte Werkstoffe*, Berlin: Beuth, 2015.
- [85] S. Orwattanasrikul, Experimentelle Analyse der Scherdeformation biaxial verstärkter Mehrlagengestricke, Dresden, 2006.
- [86] D. E. I. 1172, *Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts - Kalzinierungsverfahren*, Berlin: Beuth, 1996.
- [87] K. Schiebold, Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Durchstrahlungsprüfung, Heidelberg: Springer Verlag, 2015.
- [88] D. E. I. 527-4, *Bestimmung der Zugeigenschaften - Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*, Berlin: Beuth, 1991.
- [89] D. E. I. 178, *Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*, Berlin: Beuth, 2013.
- [90] D. E. I. 179-2, *Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften, Teil 2 Instrumentierte Schlagzähigkeit*, Berlin: Beuth, 2012.
- [91] D. E. I. 6603-2, *Kunststoffe - Bestimmung des Durchstoßverhaltens von festen Kunststoffen, Teil 2 Instrumentierter Schlagversuch*, Berlin: Beuth, 2000.
- [92] S. Krömer und T. Kahmann, „Crashanlage mit entkoppelter Crashmesswand“. Deutschland Patent P16891DE-RUE/kl , 23 05 2017.
- [93] C. Scheffler, *Zur Beurteilung von AR-Glasfasern in alkalischer Umgebung*, Dresden, 2009.
- [94] D. Wetjen, Wechselwirkungen von Carbonfasern, Schlichte und epoxidbasierter polymerer Matrix in carbonfaserverstärkten Kunststoffen, Augsburg, 2016.
- [95] Mettler Toledo, „www.mt.com,“ [Online]. Available: http://www.mt.com/de/en/home/supportive_content/matchar_apps/MatChar_HB412.html . [Zugriff am 19 05 2017].
- [96] Texttechno, „Drapetest Prüfung“, Mönchengladbach, 2018.
- [97] M. Gupta und K. Wang, „Fiber Orientation and Mechanical Properties of Short-Fiber-Reinforced Injection-Molded Composites: Simulated and Experimental Results,“ *Polymer Composites*, pp. Vol.14, No. 5, 1993.
- [98] F. Johannaber und W. Michaeli, *Handbuch Spritzgießen*, München: Hanser Verlag, 2004.
- [99] F. Truckenmüller, „Direktverarbeitung von Endlosfasern auf Spritzgießmaschinen - Möglichkeiten und Grenzen,“ VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996.
- [100] M. Madhukar und L. T. Drzal, „Fibre-matrix adhesion and its relationship to composite

-
- mechanical properties,“ *Journal of Material Science*, pp. Volume 28, Issue 3, 02 1993.
- [101] T. Aurich, *Spritzgießen und resultierende Verbundeigenschaften von flachfaserverstärkten Polypropylen*, Chemnitz, 2001.
- [102] J. Wiedemann, *Leichtbau - Elemente und Konstruktion*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [103] Bond Laminates, „www.bond-laminates.de,“ 17 10 2017. [Online]. Available: <http://bond-laminates.de/de/ueber-bond/pressemitteilungen-medien/aktuelle-pressemitteilungen/2017-00081/>. [Zugriff am 03 02 2019].
- [104] I. 3341, *Textile glass - Yarns - Determination breaking force and breaking elongation*, Genf: International Organization for Standardization, 2000.
- [105] F. Jesse, *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*, Dresden, 2004.

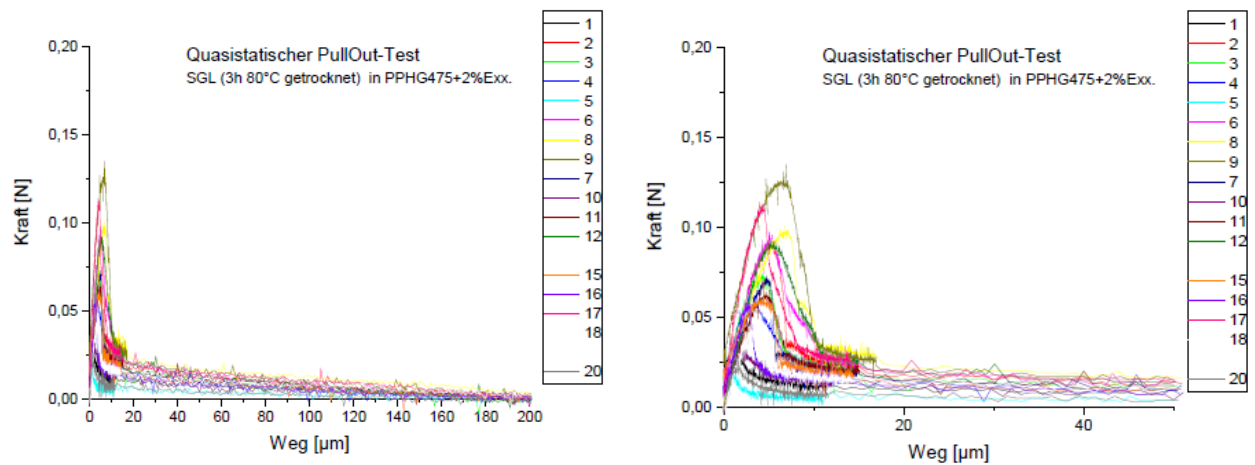
Anhang

Kraft-Weg Kurven Single-Fibre Pull-Out (vgl. Kapitel 5.1.2) [74]

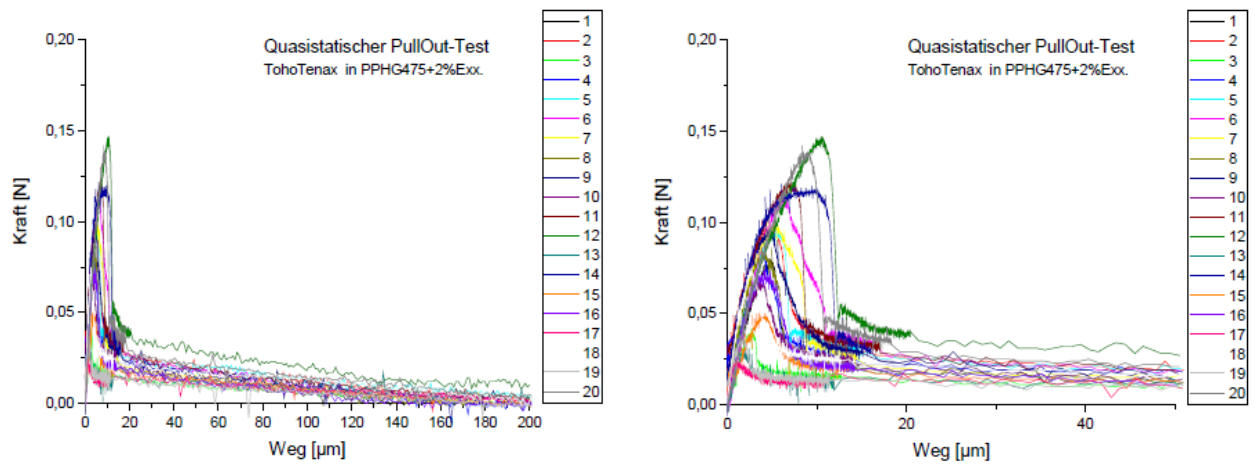
Carbon 1 klimatisiert (Übersicht links, Detail rechts)



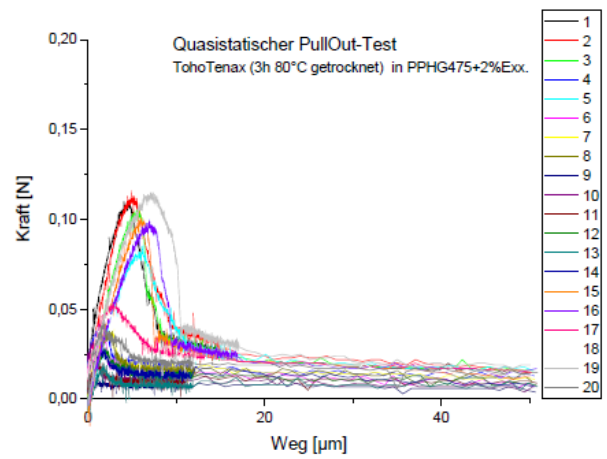
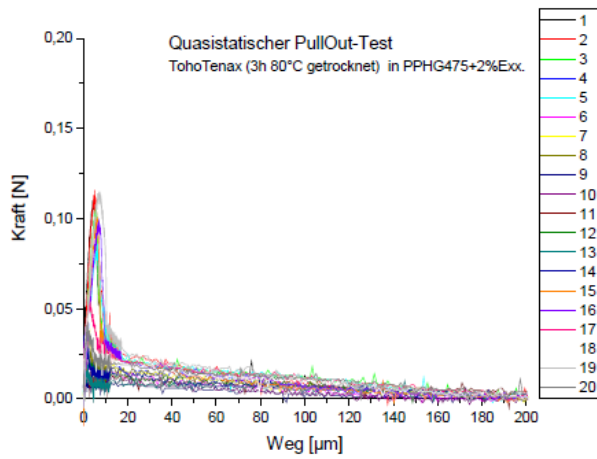
Carbon 1 getrocknet (Übersicht links, Detail rechts)



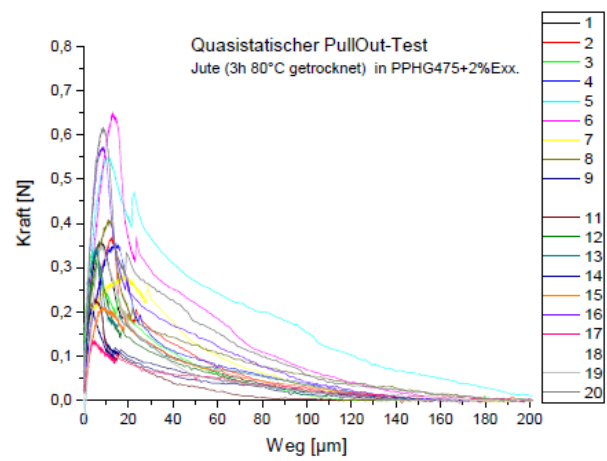
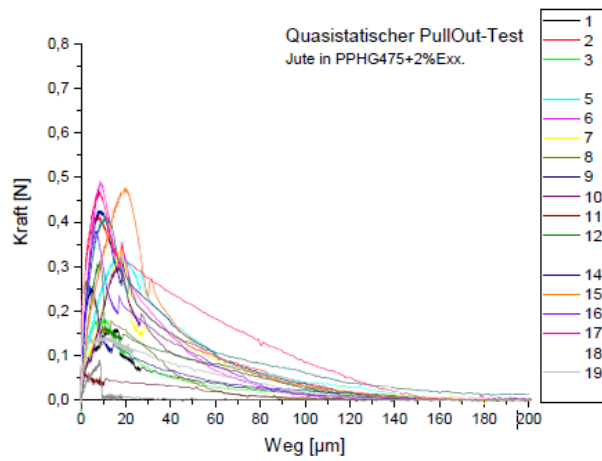
Carbon 2 klimatisiert (Übersicht links, Detail rechts)



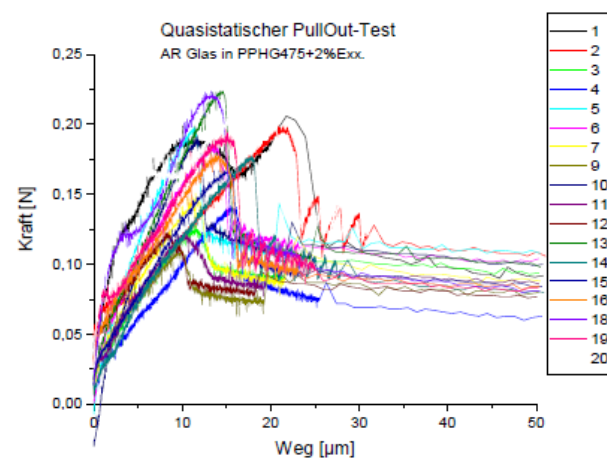
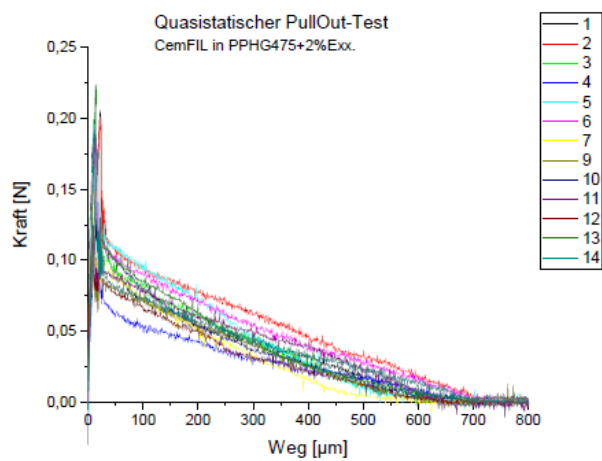
Carbon 2 getrocknet (Übersicht links, Detail rechts)



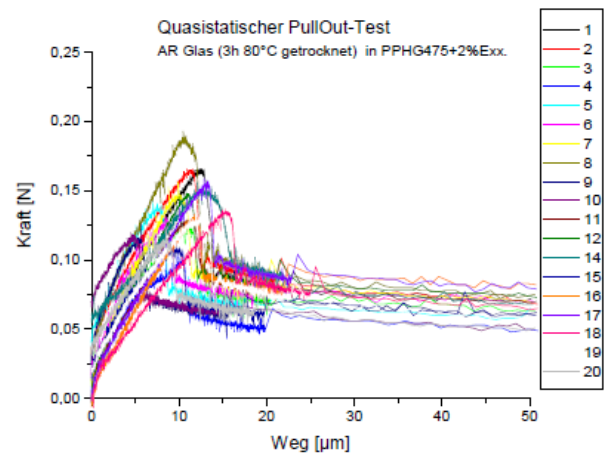
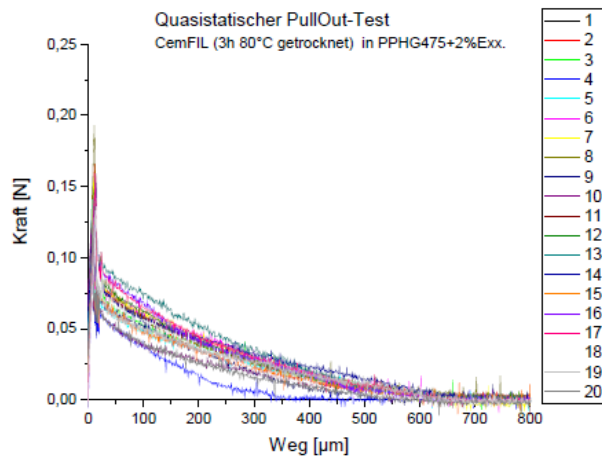
Jute Übersicht (klimatisiert links, getrocknet rechts)



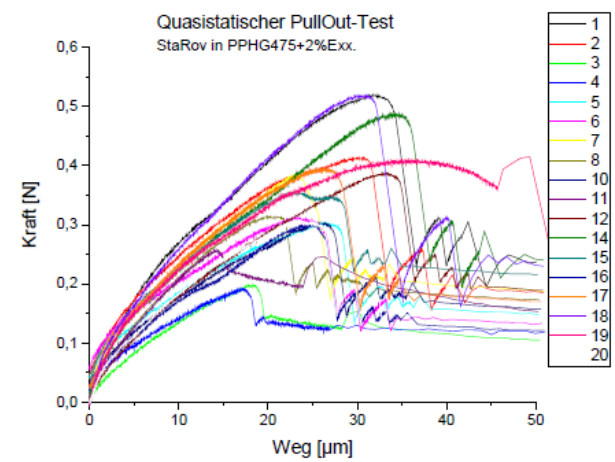
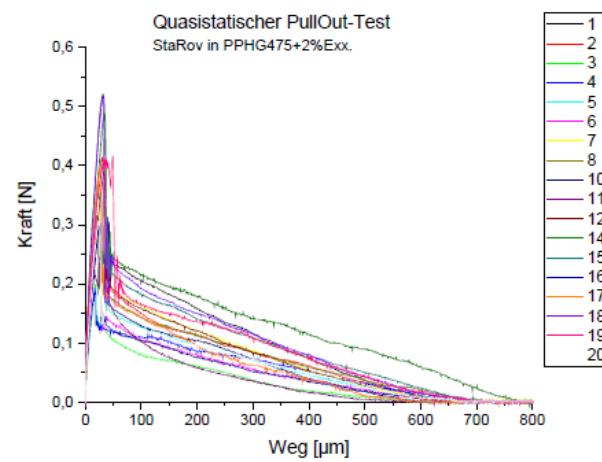
Glas 1 klimatisiert (Übersicht links, Detail rechts)



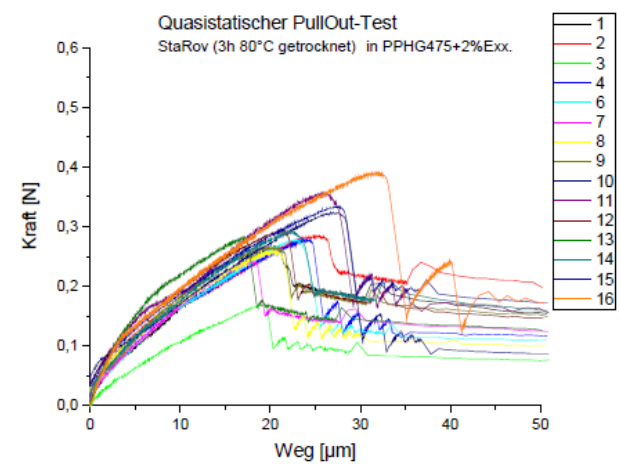
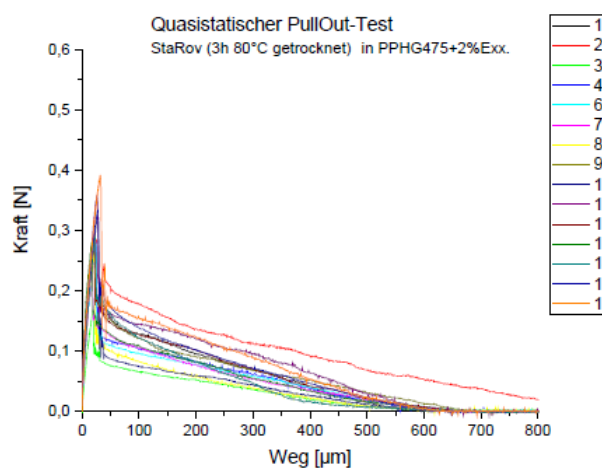
Glas 1 getrocknet (Übersicht links, Detail rechts)



Glas 2 klimatisiert (Übersicht links, Detail rechts)



Glas 2 getrocknet (Übersicht links, Detail rechts)



CT-Aufnahmen aufgeschobenes Gewebe in 1D-Platte

CT-Aufnahme 1D-Platte mit doppelter SBR-5x5 Verstärkung

